



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## POUŽITÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU PRO NÁVRH VÝROBY NÁHRADNÍCH DÍLŮ

USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR THE DESIGN OF SPARE PARTS PRODUCTION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Šafl

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Pavel Šafl

**ID:** 195439

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Použití technologie 3D tisku pro návrh výroby náhradních dílů**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s možnostmi využití 3D tisku pro výrobu náhradních dílů pro servisní oddělení ve firmě. Seznamte se s mechanickými a klimatickými zkouškami, které lze provádět na 3D tištěných dílech. Zhodnoťte strukturně mechanické vlastností a životnosti materiálů vyrobených touto technologií. Vyberte a zhotovte testovací sady různých materiálů, které se podrobí zkouškám. Porovnejte naměřené hodnoty prvků, které po 3D tisku prošly dalšími úpravami, které by měly zajistit lepší vlastnosti, oproti prvkům, které tyto úpravy nepodstoupily. Připravte seznam dílů, které lze zhotovit na 3D tiskárnách a tím zmenšit provozní náklady na servis firmy. Připravte studii pro vybranou firmu, kde bude vybrána technologie 3D tisku s největší návratností a připravte podklady pro tisk na této technologii.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce řeší problematiku 3D tisku ve firmách. Cílem bylo popsat aditivní výrobu a 3D tiskové technologie. Dále bylo potřeba vybrat nejběžnější materiály, které se používají a popsat jejich vlastnosti. Bylo potřeba provést studii mechanických namáhání a zpracovat podrobný popis mechanických vlastností materiálů. Z těchto podkladů byly popsány způsoby použití 3D tisku v automobilovém průmyslu a pro servisní střediska v průmyslu. V praktické části bylo nutné zhotovit zkušební tělesa z různých materiálů a vyzkoušet, jaký má na zkušební tělesa vliv žíhání a UV degradace v klimatické komoře. Z výsledků byly zpracovány tahové diagramy, které posléze byly použity pro případové studie. Případové studie byly vypracovány pro reálné prvky v průmyslu, které bylo nutné modifikovat pro 3D tisk.

## **Klíčová slova**

3D tisk, Aditivní výroba, případové studie, tiskové materiály, mechanické vlastnosti

## **Abstract**

This seminar thesis deals with the issue of 3D printing in companies. The aim was to describe additive manufacturing and 3D printing technologies. Moreover, to select the most common materials which are used and describe them. It was also necessary to perform a study of mechanical stresses and prepare a detailed description of the mechanical properties of materials. From these data, methods of use in the automotive industry were described. The most important part was to introduce case studies and create a description of which 3D printing technologies have the fastest return on investment.

## **Keywords**

3D print, additive manufacturing, case study, 3D print material, mechanical properties

## **Bibliografická citace**

ŠAFL, Pavel. *Použití technologie 3D tisku pro návrh výroby náhradních dílů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134502>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Tomáš Binar.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Bc. Pavel Šafl  
**VUT ID studenta:** 195439  
**Typ práce:** Diplomová práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:**

Použití technologie 3D tisku pro návrh výroby náhradních dílů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. 5. 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.*

V Brně dne: **24. 5. 2021**

.....

podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	14
SEZNAM TABULEK.....	15
SEZNAM GRAFŮ .....	16
ÚVOD .....	17
<b>1. HISTORIE 3D TISKU .....</b>	<b>19</b>
<b>2. ADITIVNÍ VÝROBA POMOCÍ 3D TISKU .....</b>	<b>20</b>
2.1 METODA FDM (FUSED DEPOSITING MODELING) .....	20
2.2 METODA SLA (STEREOLITOGRAFIE).....	22
2.3 TECHNOLOGIE MJF A SLS .....	23
2.4 TECHNOLOGIE MJF (MULTI JET FUSION) .....	24
2.5 BINDER JETTING .....	25
2.6 TECHNOLOGIE SLM A DMLS (SELECTIVE LASER MELTING A LASER POWDER BED FUSION) .....	26
2.7 MARKFORGED FFF AND CFF (FUSED AND CONTINUOUS FILAMENT FABRICATION).. .....	27
<b>3. MATERIÁLY PRO FDM A SLA TISK .....</b>	<b>28</b>
3.1 ABS (AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN) .....	28
3.2 PLA (POLYLACTID ACID).....	29
3.3 PET-G (POLYETHYLENTEREFTALÁT) .....	31
3.4 HIPS (POLYSTYREN) .....	31
3.5 ASA (AKRYLONITRIL-STYREN-AKRYL) .....	32
3.6 ONYX (NYLON CARBON FIBER).....	33
3.7 VYSOKOPEVNOSTNÍ RESIN RIGID (PRYSKYŘICE) .....	35
<b>4. AUTOMOTIV A 3D TISK .....</b>	<b>36</b>
4.1 POŽADAVKY NA AUTOMOBILOVÉ DÍLY .....	37
4.1.1 HMOTNOST .....	37
4.1.2 SLOŽITÉ GEOMETRIE.....	37
4.1.3 TEPLOTNÍ STÁLOST .....	37
4.1.4 VLHKOST .....	37
4.1.5 KONSOLIDACE DÍLŮ.....	37
<b>5. APLIKACE 3D TISKU V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU.....</b>	<b>39</b>
5.1 SLOŽITÉ POTRUBÍ .....	39
5.2 VYSOCE DETAILNÍ PROTOTYPY .....	39
5.3 FUNKČNÍ DÍLY .....	39
5.4 VÝROBA FOREM PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ .....	40
5.4.1 SLA PRO VÝROBU FOREM S HLINÍKOVOU VÝSTUHOU .....	40
5.4.2 SLA PRO VÝROBU FOREM .....	41
5.5 KOVOVÉ DÍLY .....	41
5.5.1 TECHNOLOGIE DMLS PRO TISK KOVOVÝCH DÍLŮ.....	41
5.5.2 SLA A FDM PRO DOLÉVÁNÍ.....	41

<b>6.</b>	<b>MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ A JEJICH CHARAKTERISTIKY .....</b>	<b>43</b>
6.1	ZKOUŠKA TAHEM .....	44
6.1.1	VÝPOČTY PRO MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY .....	44
<b>7.</b>	<b>ZAŘÍZENÍ A ZKUŠEBNÍ TĚLESA PRO PŘÍPRAVU PRAKTICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>47</b>
7.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	47
7.2	TISKÁRNY PRO VÝROBU ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	48
7.2.1	TISKÁRNA ENDER 3 PRO.....	48
7.2.2	TISKÁRNA A8.....	49
7.3	NASTAVENÍ PARAMETRŮ TISKÁREN .....	50
7.4	ŽÍHÁNÍ .....	51
7.4.1	VYSOUŠECÍ KOMORA PRO ŽÍHÁNÍ.....	51
7.4.2	POSTUP ŽÍHÁNÍ TERMOPLASTŮ .....	52
7.4.3	STRUKTURNÍ PŘEMĚNY V TERMOPLASTECH .....	53
7.4.4	VLIV ŽÍHÁNÍ NA VLASTNOSTI TERMOPLASTŮ.....	53
7.5	ŽÍHÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	53
7.5.1	STANOVENÍ TEPLoty A ČASU ŽÍHÁNÍ.....	53
7.5.2	ŽÍHÁNÍ MATERIÁLU PLA.....	54
7.6	VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ ŽÍHÁNÍ.....	56
7.6.1	VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ ŽÍHÁNÍ PRO PLA .....	56
7.6.2	VYHODNOCENÍ A ZHODNOCENÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ.....	61
<b>8.</b>	<b>KLIMATICKÉ ZKOUŠKY .....</b>	<b>65</b>
8.1	KLIMATICKÁ KOMORA .....	65
8.1.1	KLIMATICKÁ KOMORA Q-SUN-XE3.....	65
8.2	NASTAVENÍ CYKLŮ KLIMATICKÉ KOMORY .....	69
8.3	MĚŘENÍ V KLIMATICKÉ KOMOŘE .....	70
8.4	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ V KLIMATICKÉ KOMOŘE .....	71
8.4.1	VYHODNOCENÍ PLA HTPRO PLASTIKA TRČEK.....	71
8.4.2	VYHODNOCENÍ MATERIÁLU HIPS PLASTIKA TRČEK .....	72
8.4.3	ZHODNOCENÍ MATERIÁLU ASA.....	73
<b>9.</b>	<b>TAHOVÉ ZKOUŠKY.....</b>	<b>74</b>
9.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU PLA HTPRO .....	74
9.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU HIPS.....	78
9.3	TAHOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU ASA .....	81
<b>10.</b>	<b>PŘÍPADOVÉ STUDIE .....</b>	<b>83</b>
10.1	DRŽÁK ALTERNÁTORU .....	83
10.1.1	PRŮMYSLOVÝ 3D TISK FDM ABS .....	84
10.1.2	VSTŘIKOVÁNÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ ABS S 3D VYTIŠTĚNÝMI FORMAMI SLA.....	84
10.1.3	TRADIČNÍ VSTŘIKOVANÉ DÍLY Z ABS .....	84
10.1.4	ZHODNOCENÍ.....	84
10.2	MATICE FILTRU .....	85
10.2.1	PRŮMYSLOVÝ 3D TISK FDM ZA POUŽITÍ RŮZNÝCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ .....	85
10.2.2	SLA TISK.....	85
10.2.3	3D TISK KOMPOZITŮ METODOU FFF+CFF .....	86



10.2.4	ZHODNOCENÍ.....	86
10.3	BOSCH ÚCHOPOVÝ PRST ROBOTA.....	86
10.3.1	METODA 3D TISKU FDM .....	87
10.3.2	SLA TISK.....	88
10.3.3	ZHODNOCENÍ.....	88
10.4	DRŽÁKY OPTICKÉHO ČIDLA .....	89
10.4.1	VÝROBA METODOU FDM.....	90
10.4.2	ZHODNOCENÍ.....	92
<b>11.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>93</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>98</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Rozdělení technologií 3D tisku [3]</i> .....	20
<i>Obr. 2 Ukázka pomocné struktury brim</i> .....	21
<i>Obr. 3 Ukázka SLA tisku Top-down [3]</i> .....	22
<i>Obr. 4 Ukázka tisku Bottom-up [3]</i> .....	23
<i>Obr. 5 Ukázka tisku metodou SLS [5]</i> .....	23
<i>Obr. 6 Ukázka metody MJF [6]</i> .....	24
<i>Obr. 7 Ukázka metody Binder Jetting [7]</i> .....	25
<i>Obr. 8 Ukázka metody SLM [8]</i> .....	26
<i>Obr. 9 Zařízení Markforged pro tisk kompozitních materiálů [9]</i> .....	27
<i>Obr. 10 Složení ABS [10]</i> .....	28
<i>Obr. 11 Vznik materiálu PLA [13]</i> .....	29
<i>Obr. 12 Hydrolytická reakce [13]</i> .....	30
<i>Obr. 13 Schéma rozdělení mechanických charakteristik [23]</i> .....	43
<i>Obr. 14 Graf zobrazující deformaci tělesa [23]</i> .....	46
<i>Obr. 15 Typické křivky napětí/poměrné prodloužení [26]</i> .....	46
<i>Obr. 16 Zkušební těleso 1A dle normy ČSN EN ISO 527-2 [27]</i> .....	47
<i>Obr. 17 Modifikovaná tiskárna Ender 3 PRO</i> .....	48
<i>Obr. 18 Tiskárna vlastní výroby A8</i> .....	49
<i>Obr. 19 Ukázka teplotní věže</i> .....	51
<i>Obr. 20 Ukázka vysoušecí komory pro žihání</i> .....	52
<i>Obr. 21 Vzor zkušebního tělesa pro prostupu tepla celým objemem tělesa</i> .....	54
<i>Obr. 22 Zobrazení uspořádání lamp v klimatické komoře [30]</i> .....	66
<i>Obr. 23 Zobrazení odstříkovacích hlav v klimatické komoře [30]</i> .....	66
<i>Obr. 24 Zobrazení panelu klimatické komory s popisem [30]</i> .....	67
<i>Obr. 25 Klimatická komora Q-SUN Xe-3</i> .....	68
<i>Obr. 26 Zobrazení uspořádání těles v klimatické komoře</i> .....	70
<i>Obr. 27 Ukázka deformovaného tělesa, které nebylo vyžeháno</i> .....	71
<i>Obr. 28 Ukázka deformovaného tělesa, které nebylo vyžeháno</i> .....	71
<i>Obr. 29 Ukázka deformace tělesa žíhaného na 60 °C</i> .....	72
<i>Obr. 30 Ukázka nedeformovaného tělesa po žihání na 90 °C</i> .....	72
<i>Obr. 31 Ukázka deformace nežíhaného zkušebního tělesa HIPS</i> .....	73
<i>Obr. 32 Ukázka degradace tělesa po 6 cyklech v klimatické komoře</i> .....	73
<i>Obr. 33 Ukázka těles z materiálu ASA (horní těleso bylo v komoře a spodní bylo jen vyžeháno)</i> .....	73
<i>Obr. 34 Univerzální měřicí přístroj Zwick/Roell Z010 TE</i> .....	74
<i>Obr. 35 Ukázka vzorků materiálu PLA HTPRO</i> .....	75
<i>Obr. 36 Přístroj pro tahové zkoušky TEMPOS ZD20/200 kN</i> .....	78
<i>Obr. 37 Zobrazení mikrotrhlin materiálu HIPS</i> .....	81
<i>Obr. 38 Roztržená tělesa z materiálu ASA</i> .....	82
<i>Obr. 39 Držáky alternátoru vyrobené různými metodami shora: SLA, FDM, vstřikování</i> .....	83
<i>Obr. 40 Matice filtru tištěna metodou FDM</i> .....	85
<i>Obr. 41 Kryt uchopovacích kleští zamezující poškrábání výsledného produktu</i> .....	87
<i>Obr. 42 Tištěné kryty uchopovacích prstů automatické linky</i> .....	87
<i>Obr. 43 Tištěné kryty uchopovacích kleští (vlevo FDM technologie, vpravo SLA technologie)</i> .....	88
<i>Obr. 44 Ukázka navrženého tělesa pro nové čidlo</i> .....	91
<i>Obr. 45 Ukázka aplikace nového držáku čidla</i> .....	91

# SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Mechanické vlastnosti materiálu ABS - M30 [12]</i> .....	29
<i>Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu PLA [14]</i> .....	30
<i>Tabulka 3 Výrobce udávané parametry PET-G [15]</i> .....	31
<i>Tabulka 4 Mechanických vlastností materiálu HIPS [24]</i> .....	32
<i>Tabulka 5 Mechanických vlastností materiálu ASA [25]</i> .....	32
<i>Tabulka 6 Mechanické parametry materiálu ONYX s karbonovými vlákny [17]</i> .....	33
<i>Tabulka 7 Parametry a popis materiálů zanesených do grafů [17]</i> .....	33
<i>Tabulka 8 Mechanické vlastnosti materiálu resin Rigid [18]</i> .....	35
<i>Tabulka 9 Souhrn dílů, které lze vyrábět aditivní výrobou</i> .....	38
<i>Tabulka 10 Legenda pro obr. 15 typické křivky napětí/poměrného prodloužení [26]</i> .....	46
<i>Tabulka 11 Specifikace FDM tiskáren pro tisk zkušebních těles</i> .....	50
<i>Tabulka 12 Ukázka nastavení parametrů tisku</i> .....	50
<i>Tabulka 13 Naměřených a vypočtených hodnot pro materiál PLA Creality</i> .....	55
<i>Tabulka 14 Ceny použitých materiálů</i> .....	56
<i>Tabulka 15 Změna rozměrů materiálu PLA HTPRO a PLA Prusa GB</i> .....	57
<i>Tabulka 16 Procentuální změna rozměrů materiálů PLA HTPRO a PLA Prusa GB</i> .....	57
<i>Tabulka 17 Změna rozměrů materiálu PLA Creality white a PLA-ST Creality</i> .....	58
<i>Tabulka 18 Procentuální změna rozměrů materiálů PLA Creality white a PLA-ST Creality</i> .....	58
<i>Tabulka 19 Zobrazení cen materiálu</i> .....	61
<i>Tabulka 20 Změna rozměrů materiálu HIPS a ABS</i> .....	61
<i>Tabulka 21 Procentuální změna rozměrů materiálu HIPS a ABS</i> .....	62
<i>Tabulka 22 Změny rozměrů materiálu ASA a PET-G</i> .....	62
<i>Tabulka 23 Procentuální změny rozměrů materiálu ASA a PET-G</i> .....	63
<i>Tabulka 24 Popis filtrů pro klimatickou komoru [30]</i> .....	65
<i>Tabulka 25 Programu klimatické komory [30]</i> .....	68
<i>Tabulka 26 Nastavení cyklů klimatické komory</i> .....	69
<i>Tabulka 27 Naměřených a vypočtených hodnoty pro materiál PLA HTPRO</i> .....	76
<i>Tabulka 28 Naměřených a vypočtených hodnoty pro materiál HIPS</i> .....	79
<i>Tabulka 29 Naměřených a vypočtených hodnoty pro materiál ASA</i> .....	81
<i>Tabulka 30 Zhodnocení výrobního procesu</i> .....	84
<i>Tabulka 31 Zhodnocení návratnosti investice</i> .....	86
<i>Tabulka 32 Zhodnocení návratnosti investice</i> .....	89
<i>Tabulka 33 Naměřené hodnoty pro různé materiály před a po degradaci</i> .....	90
<i>Tabulka 34 Zhodnocení návratnosti investice</i> .....	92
<i>Tabulka 35 Nastavení tiskového profilu pro materiál ASA</i> .....	99
<i>Tabulka 36 Nastavení tiskového profilu pro materiál ABS</i> .....	99
<i>Tabulka 37 Nastavení tiskového profilu pro materiál HIPS</i> .....	100
<i>Tabulka 38 Nastavení tiskového profilu pro materiál PLA HTPRO</i> .....	100

# SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Závislost napětí v ohybu na poměrném prodloužení materiálu bez výztuže [17]</i>	34
<i>Graf 2 Závislost napětí v ohybu na poměrném prodloužení materiálu s výztuží [17]</i>	34
<i>Graf 3 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose x</i>	59
<i>Graf 4 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose y</i>	60
<i>Graf 5 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose z</i>	60
<i>Graf 6 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose x</i>	64
<i>Graf 7 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose y</i>	64
<i>Graf 8 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose z</i>	64
<i>Graf 9 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (nežiháno, komora ANO)</i>	77
<i>Graf 10 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 80 °C, komora ANO)</i>	77
<i>Graf 11 Zobrazení tahového diagramu pro materiál HIPS 90 °C a HIPS 90 °C komora</i>	80
<i>Graf 12 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 0 °C, Klimatická komora NE)</i>	82
<i>Graf 13 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (nežihány, komora NE)</i>	101
<i>Graf 14 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 80 °C, komora NE)</i>	101
<i>Graf 15 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 100 °C, komora NE)</i>	102
<i>Graf 16 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 120 °C, komora NE)</i>	102
<i>Graf 17 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (nežiháno, komora ANO)</i>	103
<i>Graf 18 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 80 °C, komora ANO)</i>	103
<i>Graf 19 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 100 °C, komora ANO)</i>	104
<i>Graf 20 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 120 °C, komora ANO)</i>	104
<i>Graf 21 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 0 °C, Klimatická komora NE)</i>	105
<i>Graf 22 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 0 °C, Klimatická komora ANO)</i>	105
<i>Graf 23 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 70 °C, Klimatická komora NE)</i>	106
<i>Graf 24 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 70 °C, Klimatická komora ANO)</i>	106
<i>Graf 25 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 80 °C, Klimatická komora NE)</i>	107
<i>Graf 26 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 80 °C, Klimatická komora ANO)</i>	107
<i>Graf 27 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 90 °C, Klimatická komora NE)</i>	108
<i>Graf 28 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 90 °C, Klimatická komora ANO)</i>	108
<i>Graf 29 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 0 °C, Klimatická komora NE)</i>	109
<i>Graf 30 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 0 °C, Klimatická komora ANO)</i>	109
<i>Graf 31 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 90 °C, Klimatická komora ANO)</i>	110

# ÚVOD

Jelikož Průmysl 4.0 zasahuje a implementuje se do firem čím dál tím více, pomalu vytlačuje tradiční výrobu a zastaralé principy. Jednou z částí pro inteligentní firmy je i inteligentní servis, který v sobě zahrnuje mimo jiné aditivní výrobu. Ačkoliv aditivní výroba byla poprvé vyvinuta před několika desítkami let, teprve nedávno se stala nedílnou součástí výrobních a servisních procesů mnoha společností.

Tradiční výrobní technologie jsou obvykle subtraktivní povahy a začínají blokem suroviny. To znamená, že součást je vytvořena odříznutím od většího bloku, buď ručně, nebo pomocí CNC stroje. Subtraktivní techniky se používají na široké škále materiálů pro stovky aplikací, od průmyslových kovových dílů až po plastové spotřební zboží.

Aditivní výroba, na druhé straně, obvykle začíná prázdným stolem. K vytvoření součástí jsou postupně přidávány vrstvy materiálu, které jsou spojovány dohromady. Většina těchto technologií potřebuje k práci krom počátečních dat o výrobku, také software pro 3D modelování neboli CAD a k tomu ještě slicer. Některé subtraktivní výroby se bez 3D softwaru ještě obejdou, ale aditivní výroba nikoliv. Velká část zpracování, od řezání vrstev až po přípravu tisku, je automatizovaná, a proto se zdá, že je tato varianta na první pohled rychlejší než klasické metody. Bohužel je to jen na první pohled, protože aditivní výroba je procesově sice jednodušší, ale zato mnohokrát pomalejší při výrobě než klasické CNC stroje.

Aditivní výroba popisuje výrobní metodu, při níž se materiál přidává vrstvu po vrstvě. 3D tisk je název pro konkrétní proces, který spadá pod deštník AV (aditivní výroby). Mnoho zdrojů používá termíny zcela zaměnitelně, a to proto, že v současné době je jedním z nejpoužívanějších procesů AV právě 3D tisk.

Terminologie může být matoucí, protože mnoho procesů AV je také charakterizováno jako 3D tisk. Tyto procesy se však od sebe navzájem liší klíčovými způsoby. 3D tisk pokrývá širokou škálu metod, včetně procesů vytlačování materiálů jako je FDM (FUSED DEPOSITING MODELING), vytvrzování materiálu jako SLA (stereolitografie), selektivní laserové slicování atd. Pro procesy 3D tisku jsou často používají polymery, jako jsou termoplasty a kapalné pryskyřice, ale některé pracují s kovy a jiné dokonce i s keramikou.

AV má řadu výhod oproti starším metodám, a to třeba rychlé a levné prototypování, protože procesy jako 3D tisk umožňují rychlé a ekonomické iterace designu na začátku výrobního procesu. Umožňuje také vysoký stupeň svobody designu. Když designéři nejsou omezeni formami nebo předřezanými bloky materiálu, mohou vytvářet složité a plně přizpůsobené díly. Nejvíce se AV využívá v automobilovém průmyslu, jelikož je levná, rychlá a zvládne vytvořit desítky prototypů v rané fázi vývoje, které jsou ideální pro ověřování designu. Dalším využitím je funkční testování, například v tunelu, pro testy proudění vzduchu. Tato metoda umožňuje lepší inovace a pomáhá společnostem udržet náskok před konkurencí.

V letectví a kosmonautice se AV používá k úspoře hmotnosti. Za tímto účelem je potřeba nahradit těžké kovové díly lehkými, ale odolnými plastovými částmi. Pro úsporu hmotnosti se také používá topologická optimalizace, kterou lze mnohdy vyrobit jen pomocí AV. Umožňuje také přizpůsobení dílů s vnitřními strukturami pro optimalizaci rozložení hmotnosti. Díky takovému rozložení může mít letadlo například lepší tvar a tím zlepšit svou aerodynamiku a ušetří palivo. AV se vyskytuje už v každém odvětví průmyslu, a to od stavebního, až po IT.

Cílem Diplomové práce je seznámit s principy 3D tisku a s materiály, které se zde používají. Dále se v práci popisuje, kde se dané principy dají použít a jsou zde uvedeny reálné případové studie z praxe. V případových studiích jsou vytyčeny principy výroby a náklady na výrobu požadovaných kusů. K cenové analýze je provedena i analýza mechanických vlastností daných prvků. Dále jsou vypracovány studie pro firmu BOSCH, pro kterou jsou vytvořeny případové studie na jejich komponenty.

# 1. HISTORIE 3D TISKU

Dnes jsou 3D tiskárny využívány snad ve všech odvětvích, ale nebylo tomu tak vždy. Před 3D tiskem žili produktoví designéři a umělci ve dvourozměrném světě a vytvářeli návrhy na papíře. Pokud byl 3D model nezbytný, návrháři ho museli vytvořit sestavením dílů nebo vyřezáním z plných těles. Tyto modely, známé také jako prototypy, byly časově náročné a jejich výroba byla nákladná. V 70. letech 20. století se objevil CAD software, který zlepšoval proces návrhu. Návrháři nahradili zdoluhavé ruční kresby počítačovými skicami. To ušetřilo peníze a čas, ale stále neměli snadný způsob, jak vytvořit model. [2]

Předtím než 3D software existoval, návrháři a inženýři zhotovili ploché, dvourozměrné návrhy a umělci vytvářeli 3D modely z těchto výkresů. Bohužel byl proces náročný a nákladný. To vše se změnilo díky vynálezu softwaru pro 3D počítačové navrhování (CAD 3D). [1]

Díky 3D softwaru mohli návrháři své nápady převést přímo do trojrozměrných modelů. První generace 3D CAD softwaru byla velmi drahá a vyžadovala vysoce výkonné pracovní stanice. Mezi hlavní uživatele patřily Aerospace a automobilové společnosti. Ve spolupráci se softwarovými společnostmi vylepšili technologii 3D CAD a software začal generovat modely pomocí sítě geometrických tvarů. Návrháři si mohli modely prohlížet a upravovat je na obrazovkách svých počítačů. Z těchto prvotních popisů 3D objektu za pomoci geometrie vznikl Soubor STL (stereolitografie). Díky STL už nic nebránilo užití 3D tisku, protože modely byly převedeny do jazyka, kterému mohly 3D tiskárny rozumět. Nakonec ještě software Slicer rozdělil model CAD na virtuální vrstvy pro tisk. [1][2]

V roce 1982 byl Chuck Hall konstruktérem, který se snažil vyřešit výrobní problém své firmy a v rozhovoru pro Industry Week vysvětlil problémy a popsal proces výroby formy pro vstřikování plastů. Jeho největší problém, který řešil, byl čas. Když si chtěl vyzkoušet novou technologii nebo nový výrobek, tak nejprve inženýři 3 týdny kreslili a poté 3 měsíce čekal na formu, do které byl vstříknut první výrobek. V lepším případě byl výrobek navrhnut správně, ale také se stávalo, že se muselo začít vyvíjet znovu. [1]

Hall pokračoval ve svém vývoji a nechal si patentovat design pro stereolitografickou (SLA) 3D tiskárnu. Použil UV světlo k vázání polymerů do vrstev. Světlo dopadá na vrstvu polymeru, která tvrdne a poté klesá do lázně kapalného polymeru. Každá vrstva tvrdne, dokud se nevytvoří výsledný tvar. A tak Hall vymyslel první 3D tiskárnu. [2]

Dále už postupoval vývoj daleko rychleji a vysokoškolák Carl Decker patentoval metodu 3D tisku pomocí laserové technologie. Jednalo se o selektivní laserové slinování (SLS) pomocí laserů, který váže termoplastický prášek do výsledného tvaru. [2]

Nejznámější metoda FDM byla vynalezena až jako třetí metoda. V roce 1988 hledal S. Scott Crump jednodušší způsob, jak pro svou dceru vyrobit hračku a pomocí horké lepicí pistole roztavil plast, který taval a umísťoval ho nad sebe do tenkých vrstev, čímž vznikl vynález Fused Deposition Modeling (FDM). [1][2]

Jeho stroj roztavil a vrstvil plastová vlákna na rovný povrch, který tehdy ještě nebyl vyhřívaný a vytvořil se plastový objekt. K automatizaci procesu poté použil numericky řízený (NC) software. S patentem v ruce Crump a jeho manželka Lisa založili Stratasys. FDM®. Stratasys stále existuje, ale už nikdy nebyla tak úspěšná jako v minulých letech. [2]

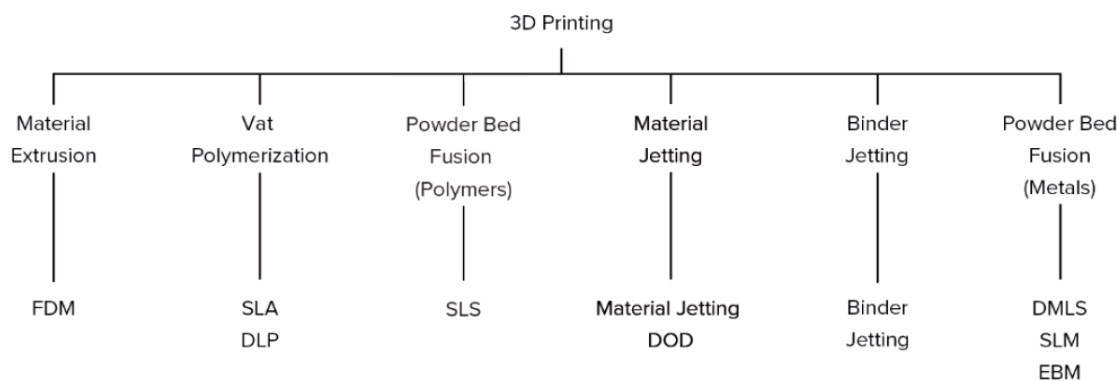
## 2. ADITIVNÍ VÝROBA POMOCÍ 3D TISKU

V této kapitole je provedeno seznámení s tiskovými metodami, které jsou používány v průmyslu, zdravotnictví, školství a v dalších odvětvích. Aditivní technologie umožňují vytvořit 3D objekt na základě dat z počítače. Celý objekt vzniká přidáváním tenkých vrstev, které se na sebe buď lepí nebo se materiál přidává tavením. Tiskárny dokážou vyrábět objekt po různých tloušťkách vrstev, které se pohybují v rozmezí setin až desetin milimetru. [2]

Objekty vyrobené aditivní výrobou mají omezenou velikost, kterou udává velikost zařízení. V dnešní době se velikost může pohybovat v řádech několika desítek centimetrů u stolních zařízení, až po několik desítek metrů u zařízení, které mohou tisknout i domy. Fyzické vlastnosti tištěného objektu ovlivňuje použitý materiál, který si lze u mnoha tiskáren zvolit v závislosti na tom, k čemu je výrobek určen. [2]

Technologie 3D tisku je jedinečná protože, pokládáním vrstev na sebe vznikají objekty, které nelze zhotovit jinou metodou. Pokud je objekt složitější a nějaká jeho část neleží na tiskové podložce, je nutné použít tzv. podpory, které fungují jako podpírající lešení. Tyto podpory lze jednoduše odstranit a stačí jen vybrousit stopy, které vznikly v místě dotyku podpory a tištěného objektu. [2]

Tato kapitola slouží pro představu, jak metody fungují a v práci jsou už jen zmiňovány. Na obr. č. 1. Jsou zobrazeny tiskové metody, které jsou nejčastěji využívány. [2]



Obr. 1 Rozdělení technologií 3D tisku [3]

### 2.1 METODA FDM (FUSED DEPOSITING MODELING)

FDM tisk je aditivní výrobní proces. Řadí se mezi metody, kdy se materiál vytlačí přes trysku. Je to princip 3D tiskárny, který se dostal z firemního prostředí až do domácností a tím se stal nejvyužívanějším principem 3D tisku. Nejvyužívanější metodou se stal z důvodu, že má snadné ovládání, provedení a rychlé uvedení do provozu. Pro samotný tisk nám stačí pouze CAD systém na návrh prvku, který se poté vyexportuje například ve formátu stl. Tento formát je nejvyužívanějším pro tento typ tiskáren a popisuje geometrii povrchu trojrozměrného objektu. Jedná se o jednoduchý formát, tudíž neudává barvy a ani míry. U FDM je tvorba objektu závislá na kladení jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Materiály pro tuto metodu jsou termoplastická polymerová vlákna, která jsou namotána na cívkách. Výsledek FMD tisku závisí na mnoha



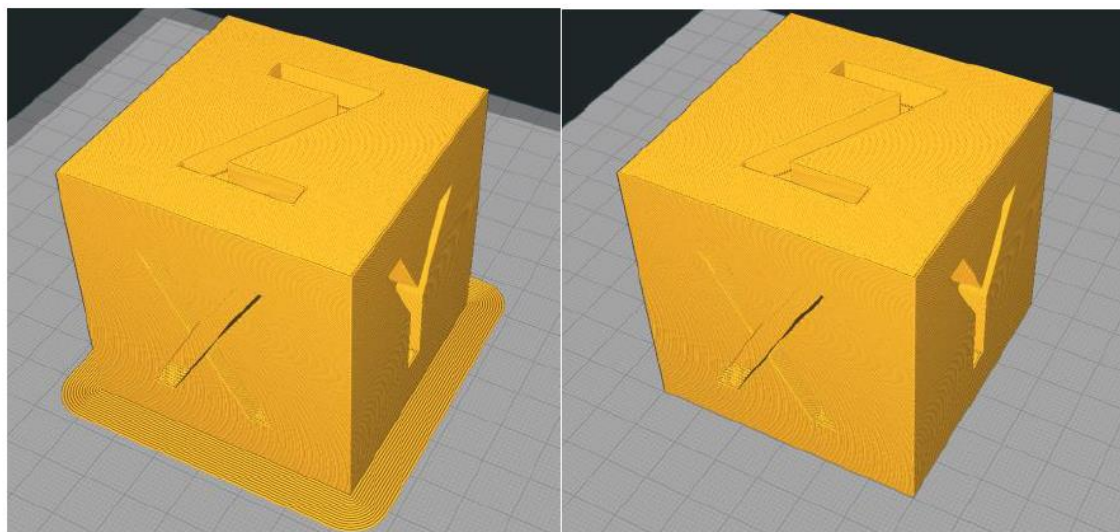
parametrech. Mezi hlavní se řadí teplota trysky, teplota podložky, rychlost chlazení, rychlost tisku a další. [2]

Parametrů u FDM tisku jsou stovky a každý může vést k dokonalejšímu tisku. Výška vrstvy u FDM tisku se pohybuje mezi 50 až 400 mikrony a šířka vrstvy se odvíjí od použité trysky a nastavení. [4]

Mezi hlavní výhody této metody patří rychlost a nízké náklady na pořízení a provoz. Nevýhoda je smršťování objektu, které trápí většinu materiálů. Při tisku dochází k nerovnoměrnému chlazení vytlačeného materiálu v různých částech objektu. Tímto postupem dochází ke smršťování a může dojít k oddělení výtisku od podložky nebo k odtržení vrstev. Proto musí konstruktér při návrhu s tímto jevem počítat a zvolit vhodný materiál, který splňuje požadavky na výrobek a nebude u něj docházet k velkému smrštění. Tento problém se řeší změnou materiálu nebo pojištěním prvku proti deformaci. Jako pojištění proti deformaci může sloužit například takzvaný brim, který je na obr. č. 2.

Brim je podpora, která se tiskne kolem celé první vrstvy. Tím, že má obvykle jen jednu nebo dvě vrstvy, nemá velký objem a nedochází u něj k deformaci. Tím drží prvek na podložce a zabraňuje zvedání rohů. U FDM tisku nemůžeme tisknout některé části bez takzvaných podpor. Podpory se většinou používají u převisu přesahující hodnotu úhlu 45°. Podpory můžeme tisknout různými způsoby a materiály. Pro nejlepší vlastnosti a vzhled 3D tisku je vhodné používat materiál přímo určený pro podpory. Tento materiál lze rozpouštět například i v teplé vodě, nebo v chemikáliích, které nemění vlastnosti hlavního materiálu modelu. Jako příklad lze uvést materiál HIPS, který můžeme použít jako podporu, například pro materiál ABS. HIPS je materiál, který lze rozpustit v limonenu.

Po nastavení všech parametrů je nutné vygenerovat G-code. Tento G-code slouží pro orientaci v kartézských souřadnicích, a tím říká tiskárně, v jakých osách se má pohybovat, kde začít dávkovat materiál atd.



*Obr. 2 Ukázka pomocné struktury brim*

## 2.2 METODA SLA (STEREOLITOGRAFIE)

Stereolitografie neboli SLA tisk je taktéž aditivní proces výroby. Tento proces patří do procesu fotopolymerizace. Proces funguje na principu vytvrzování polymerní pryskyřice vrstvy po vrstvě pomocí ultrafialového světla. Výška jedné vrstvy může být od 25 do 100  $\mu\text{m}$ . Materiály pro SLA tisk jsou tekuté fotocitlivé polymery. [3]

Existují dva typy SLA tiskáren, a to tiskárny top-down a bottom-up. U tiskárny Top-down je umístěn zdroj světla nad nádrží. Stůl začíná u samotné hladiny nádrže pryskyřice a po každé vrstvě sjede platforma o nastavenou hodnotu dolů. Tato metoda je zobrazena na obr.č.3. Tiskárna Bottom-up má přesně opačný princip. Top-down tiskárna se používá hlavně v průmyslu, a proto se jí budeme více věnovat. Na obr. č. 4 je zobrazen princip SLA tisku. Tento tisk dosahuje velké přesnosti, a to až  $\pm 0,15 \%$  oproti nastaveným rozměrům (dolní mez  $\pm 0,010 - 0,030 \text{ mm}$ ). [3]

Jednou z nevýhod SLA tisku je nutnost vždy použít podpurnou strukturu. Další nevýhodou je vznik takzvaného curlingu, který vzniká u objektu během tuhnutí. U curlingu dochází ke smršťování objektu, čímž se vytváří vnitřní napětí, které má za následek zvlnění součástí. Tato nevýhoda je podobná deformaci jako při FDM tisku.

Bohužel u této metody nestačí jen objekt vytisknout, ale musí se ještě vytvrdit. Vytvrzení spočívá v aplikaci ultrafialového záření na objekt, tím pak získá lepší mechanické vlastnosti. [3]

U SLA tiskárny se využívá pro tisk tekutá pryskyřice. Jak u metody FDM, tak u metody SLA, je mnoho materiálů, které je možné použít pro dosažení různých vlastností. Výhoda SLA je tisk s velkou přesností, který je vhodný jak pro tisk malých, tak i větších modelů, které potřebují mít lepší vizuální vlastnosti. Nevýhodou této metody je, že díly jsou mnohdy velice křehké, a tudíž se nehodí k mnoha aplikacím. [3]

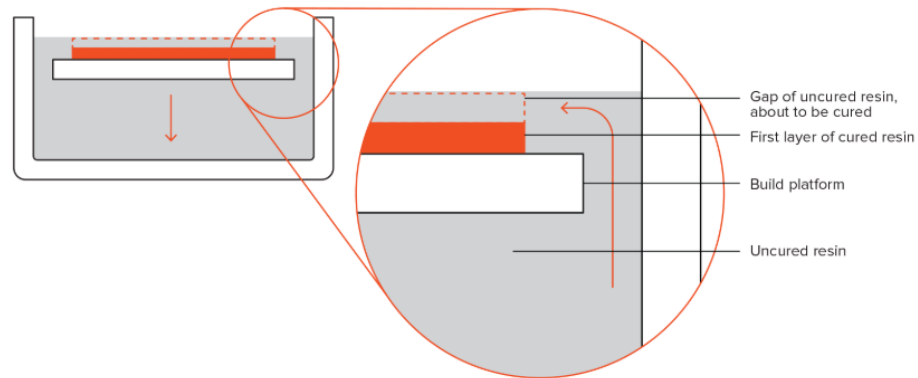
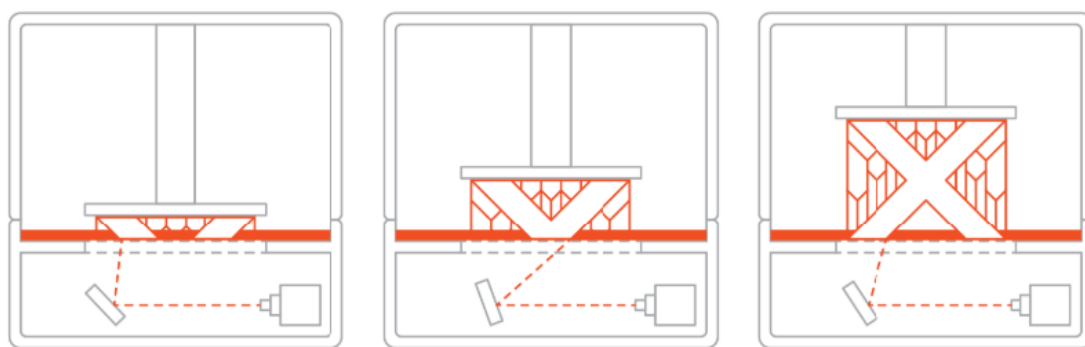


Schéma tiskárny SLA shora dolů

Obr. 3 Ukázka SLA tisku Top-down [3]



Proces 3D tisku SLA

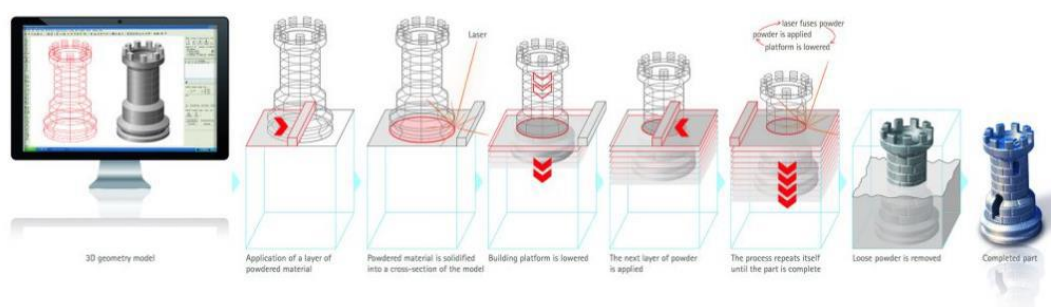
Obr. 4 Ukázka tisku Bottom-up [3]

## 2.3 TECHNOLOGIE MJF A SLS

MJF a SLS jsou naprosto odlišné od technologií, jež byly doposud zmíněny. Tyto technologie se už v domácím prostředí běžně nepoužívají, a proto je jejich hlavní využití v průmyslu. Obě metody pracují na principu spékání polyamidového prášku pomocí laseru. Nejčastěji se pro tuto technologii používá nylon. Když budeme popisovat rozdíly mezi nimi, musíme se nejprve podívat na funkci obou metod. [5]

SLS tiskárna funguje na principu laseru, který spéká nanesený prášek do celistvé vrstvy. Velkou výhodou této metody je celistvost a homogenita výsledného objektu. Velice často se používá v automobilovém průmyslu. Druhou metodou je MJF, která funguje na principu nanášení fixačního činidla. Přes místa, kde byl vypuštěn fixační prostředek, je poslána vysokofrekvenční hlava s infračerveným zdrojem světla, čímž vznikne výsledný výtisk. [5]

Podíváme-li se na přesnost tisku, obě tyto metody dosahují podobných výsledků. Nevyužívají se u nich podpory, protože materiál je podpírán zbylým práškem, který nebyl spečen. Díky této výhodě je dosaženo velké úspory materiálu, jenž by byl spotřebován na podpory. Bohužel tato metoda má i své nedostatky. Hlavní nedostatek je nutnost velmi důkladného procesu čištění, při výměně materiálu pro další tisk. Technologický postup výroby můžete vidět na obr. č.5. [5]



Obr. 5 Ukázka tisku metodou SLS [5]

## 2.4 TECHNOLOGIE MJF (MULTI JET FUSION)

Tento postup AV vychází z tradiční technologie 2D tisku. Dá se říct, že funguje totožně, jen se přidá třetí osa. Funguje na principu přejezdu tryskové hlavy, která vypouští kapičky fotocitlivého materiálu. Tento materiál musí ztuhnout pod UV světlem, a tím je schopen vytvořit celistvou vrstvu. Materiály pro tento tisk jsou termo fotopolymery, které se dodávají v kapalně formě. [6]

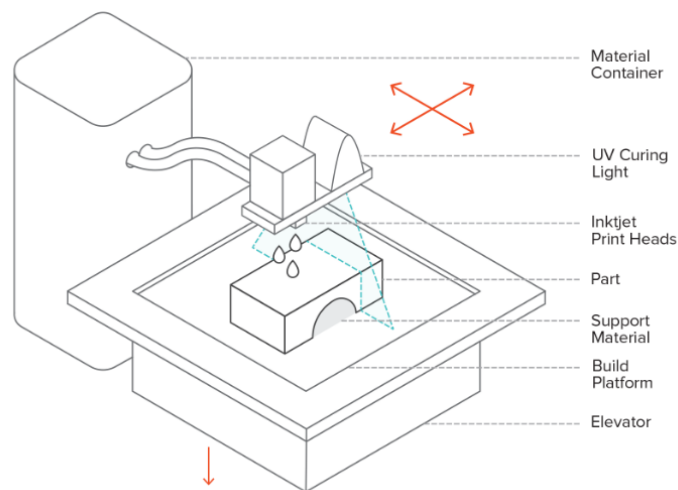
U tohoto typu tisku je výška vrstvy spojena s materiálem, který se používá. Vyplývá to z fyzikálních vlastností materiálu, poněvadž tisk probíhá pomocí vypuzování malých kapiček a každý materiál tyto kapičky vytváří různě velké. Velikosti se odhadují od 16 do 32 mikronů. I přes toto omezení se jedná o jednu z nejpřesnějších metod 3D tisku. MJ tiskárny mají přesnost  $\pm 1$  % ve všech směrech, tudíž se dá dosáhnout hodnoty přesnosti až 0,02 mm. Díky teplotě tisku, která je skoro rovna pokojové teplotě, nedochází k deformacím, jako u ostatních metod 3D tisku. Tato výhoda nám umožňuje tisk velkých a složitých objektů s velkou přesností. [6]

Výhodou této metody je možnost použít velké množství barev během tisku, což usnadňuje následnou úpravu. Dále lze kombinovat i více materiálů pro lepší parametry výsledného modelu. Materiály se dají před i během tisku mísit, a tím se mohou upravovat požadované vlastnosti, jako jsou například tvrdost, pružnost atd. [6]

Tato nastavení jsou již složitější, a proto se nepoužívá formát STL, ale formáty OBJ nebo VRML. Menší nevýhodou u tohoto tisku je použití podpor pro model. Pro podpory se většinou volí materiály rozpustné ve vodě. [6]

Velkou výhodou a zajímavostí této metody je tisk lesklých nebo matných ploch. Když je požadován lesklý tisk, tak se podpory nepoužívají. Samozřejmě, pokud prvek bude obsahovat převis, tak se podpora bude muset použít. [6]

Největší nevýhodou je cena materiálu, která se pohybuje mezi 300-1000 dolary za kilogram. Další nevýhodou jsou špatné mechanické vlastnosti výsledného modelu. Modely vytištěné touto metodou se nehodí na funkční prototypy. Materiál použitý pro tisk je fotocitlivý a časem ztrácí své vlastnosti. Náhled na funkci přístroje můžete vidět na obr. č.6. [6]



Obr. 6 Ukázka metody MJF [6]

## 2.5 BINDER JETTING

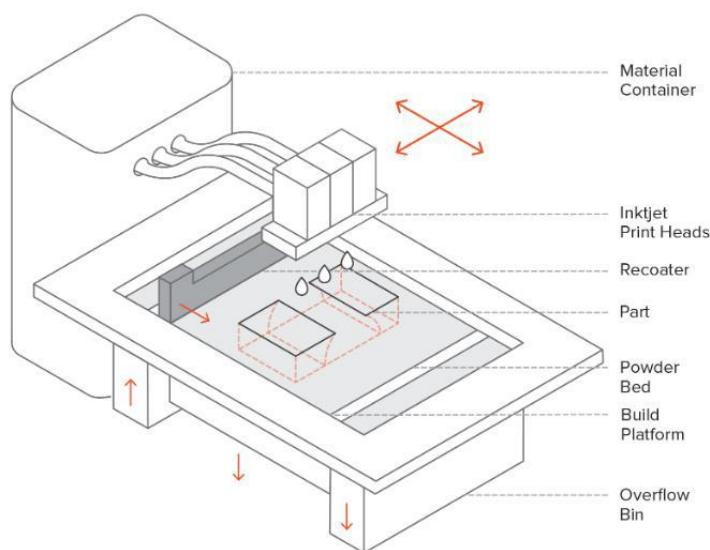
U této metody 3D tisku dochází k nanášení prášku v tenké vrstvě, na které je poté nanášeno pojivo. Obvykle se Binder Jetting používá pro materiály na bázi kovu, písku, keramiky a dalších. Tuto metodu můžete vidět na obr. č. 7. [7]

Výška vrstvy se pohybuje kolem 100 mikronů, ale lze dosáhnout, hlavně u kovů, i nižších vrstev, a to kolem 50 mikronů. Nanášení pojiva probíhá při pokojové teplotě, a tudíž nedochází k teplotní roztažnosti. Tímto procesem můžeme vytvořit velké díly až do rozměrů 800 x 500 x 400 mm. Celý přístroj má pak velikost až dva a půl metru. [7]

Výhodou je, že proces Binder Jettingu nepotřebuje žádné podpůrné struktury. Podporu tisku dělá okolní materiál, který není slepen. To je rozdíl oproti jiným technologiím, které při práci s kovem potřebují rozsáhlé podpůrné struktury. U této technologie jsou dvě hlavy, které pracují souběžně. První hlava nanáší pojivo a druhá nanáší barvu. Druhá hlava funguje jako 2D inkoustová hlava z klasické tiskárny, která jezdí za první a barví objekt požadovanou barvou. Po tisku je výrobek potažen kyanoakrylátem nebo jiným materiálem, za účelem zlepšení vlastností. Tímto procesem se zlepšují hlavně parametry, jako ochrana proti oděru, pevnost, ale i životnost barev. I po tomto procesu jsou výrobky křehké a nedoporučují se pro funkční prototypy. Hlavním využitím je tisk forem a jader pro odlévání. Formy a jádra jsou obvykle tištěny pískem a pojivem. Velkou výhodou je, že po dokončení tisku je forma okamžitě připravena k použití. Po odlévání se forma rozlomí a výrobek je vyjmut. [7]

Další metoda výroby, která se používá u Binder Jetting, je proces tryskání kovů pojivem. Tato metoda je až 10x úspornější než jiné metody, které pracují s kovem. Bohužel u kovů není tato metoda schopna dosáhnout dobrých mechanických vlastností. Pro zlepšení mechanických vlastností se dá použít pec pro vypékání pojiva. Jednou volbou je vypalování. To sestává z vypalování pojiva, které se za vysoké teploty rozpustí, čímž se ale objevují volné prostory a je vytvořen porézní materiál. Poté se nanese kapilárním způsobem bronz. Po tomto procesu dochází ke snížení pórovitosti a zvyšuje se pevnost materiálu. [7]

Druhá metoda je Sintrování. Objekty vložené do pece, kde je pojivo spáleno a zbylé kovové částice jsou slity dohromady. I tento postup vytváří porézní materiál.



Obr. 7 Ukázka metody Binder Jetting [7]



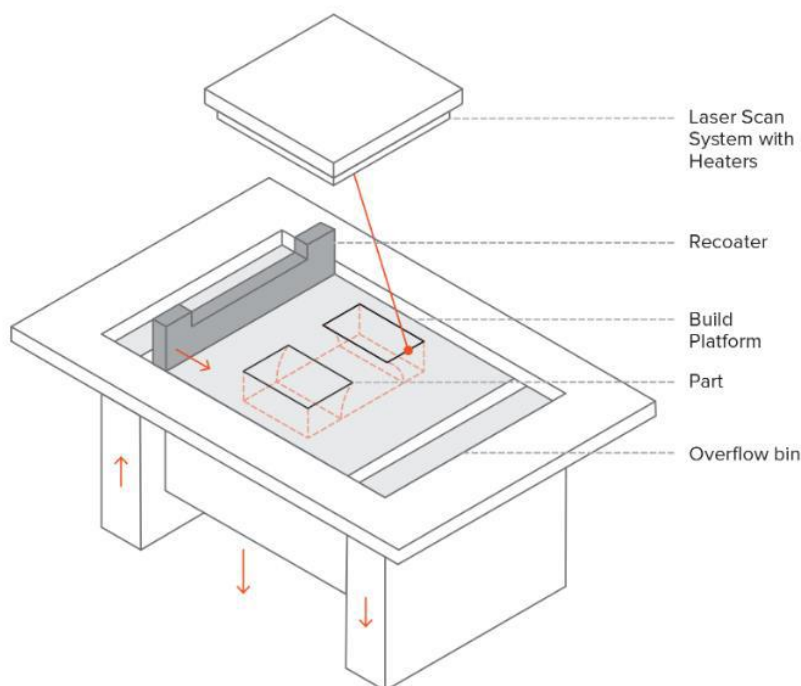
## 2.6 TECHNOLOGIE SLM A DMLS (SELECTIVE LASER MELTING A LASER POWDER BED FUSION)

Jedná se o tisk kovových materiálů. Výška vrstvy se zde pohybuje kolem 20 až 50 mikronů. Výška z větší míry závisí na vlastnostech kovového prášku. Obvyklé rozměry tiskové plochy tiskárny jsou 250 x 150 x 150 mm, ale najdeme i výrobce, kteří vyrábějí větší tiskárny, a to až o rozměrech až 500 x 280 x 360 mm. I přes tyto velké rozměry se přesnost pohybuje kolem 0,1mm. Tuto metodu můžete vidět na obr. č. 8. [8]

Kovový prášek u tisku SLM a DMLS lze snadno recyklovat a jeho odpad se odhaduje na cca 5 %. Recyklace prášku funguje jednoduše na principu prosetí. Bohužel to není jediný odpad, který vzniká při této metodě. Model je upevněn na tiskovou podložku a nemá kolem sebe podpůrný materiál, a proto je nutné tisknout podpory. Tyto podpory už po odříznutí nemají další využití. Modely se většinou tisknou pod různými úhly pro zlepšení mechanických parametrů, a tudíž se využívá ještě více podpor. [8]

Kovové díly SLM DMLS mají téměř izotropní mechanické vlastnosti. Jsou velice pevné a mají velice malou pórovitost. Pórovitost je obvykle kolem 0,2 – 0,5 %. Kovové díly mají větší pevnost a tvrdost a jsou často pružnější než díly vyráběné například obráběním. Bohužel jsou daleko více náchylné na únavu materiálu. [8]

Podpory u této metody mají více funkcí. Jako hlavní je samozřejmě podpůrná funkce. Další funkcí je ukotvení výrobku k podložce, čímž se sníží deformační účinky. Slouží také k odvodu tepla od modelu. Modely se orientují v určitém úhlu, pro minimalizaci deformace a pro maximalizaci pevnosti v kritických směrech. To však zvýší množství podpor, a tím se zvyšuje cena výrobku. Protože je tato metoda velice drahá, provádí se spousta simulací, které ilustrují, jak má být výsledný model natočen. Náklady na kovový prášek jsou velice vysoké a pohybují se kolem 350 - 450 dolarů za kilogram. Ukázka metody je zobrazena na obr. č. 8. [8]



Obr. 8 Ukázka metody SLM [8]

## 2.7 MARKFORGED FFF AND CFF (FUSED AND CONTINUOUS FILAMENT FABRICATION)

Tato technologie se na trhu objevila teprve nedávno a udělala průlom v tisku kompozitních materiálů. Tiskárna funguje na klasickém FDM principu, jen je k němu přidán princip CFF. Tiskárna má jednu hlavu, na které jsou umístěny dvě trysky. Jedna tryska se používá na tisk z nylonu nebo z materiálu zvaného ONYX. Druhá tryska, která je umístěna jen pár milimetrů před první pokládá různá vlákna přímo do roztaveného materiálu a tímto principem vzniká kompozitní 3D tisk. Tištěné díly touto technologií dosahují mechanických vlastností hliníku a v některých parametrech ho dokonce překonávají. Při porovnání hmotnosti 3D výtisku a hliníkové součásti stejných rozměrů, dosahuje výtisk asi o 40% menší hmotnosti. Zařízení na tisk kompozitních materiálů lze vidět na Obr. 9. [9]



*Obr. 9 Zařízení Markforged pro tisk kompozitních materiálů [9]*

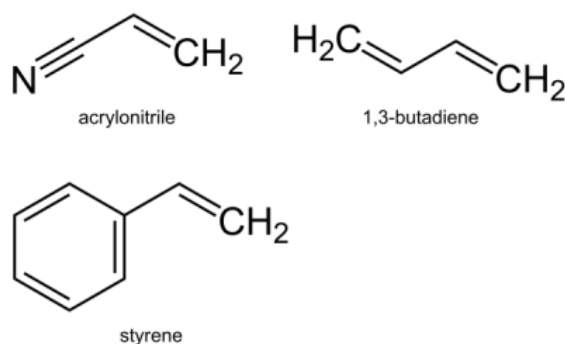
### 3. MATERIÁLY PRO FDM A SLA TISK

V této části diplomové práce jsou rozebírány základní vlastnosti materiálu pro 3D tisk. Jsou zde vybrány nejznámější materiály a jsou k nim sepsány jejich nejdůležitější parametry. Pro 3D tiskovou technologii FDM jsou materiály dodávány ve formě struny, která bývá navinutá na cívku, jejíž nosnost je 1 - 5 Kg materiálu. Oficiální název pro tyto struny je filament, který je přenesen z anglického názvu „filament“, doslovně přeloženého jako vlákno. Pro tiskárny se používají dva typy vláken, a to o tloušťce 1,75mm nebo o tloušťce 2,85 – 3 mm.

#### 3.1 ABS (AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN)

Jedná se o nejznámější materiál pro 3D tisk, který byl před lety nejpoužívanější. Kdo se zabývá 3D tiskem už pár let, tak na něm jistě začínal. Tento materiál nebyl poprvé použit na aditivní výrobu, protože se z něj vyrábí už spousty výrobků vstřikováním. Nejznámějšími výrobky z domácího prostředí jsou například lego kostky, hračky pro děti apod. V oblasti automobilů se z něj vyrábí nárazníky, mřížky chladičů, ventilátory s výdechy a spoustu dalšího. [10]

Jako většina materiálů pro 3D tisk se jedná o termoplast, který je velice odolný po všech stránkách. ABS je vyráběno s pomocí emulzí polymerace akrylonitrilu a styrenu při přítomnosti polybutadiénu. Chemický vzorec je na Obr.10. [10]



Obr. 10 Složení ABS [10]

ABS je odolný vůči většině chemikálií i vyšším teplotám. Mezi jeho další výhody patří jeho houževnatost, odolnost proti oděru, nárazu, malá navlhavost a zdravotní nezávadnost. ABS má malou reakci na změnu parametrů tisku, a to byl jeden z důvodů, proč se používal v počátcích vývoje 3D tisku, a to hlavně u projektů jako RepRap. Nevýhodou tohoto materiálu je hlavně jeho velké smrštění, a to v rozmezí od 0,3 do 0,7 %, kvůli kterému začal být nahrazován ostatními materiály. Tento nedostatek se dá napravit uzavřenou komorou, která zajišťuje konstantní teplotu v celém prostoru tiskárny. [2] [11]

Další nevýhodou je uvolňování nebezpečných látek při tavení tohoto materiálu. Uvolňování nebezpečných látek lze zajistit například HEPA filtry.

Existují i modifikace ABS, jež upravují jeho vlastnosti. Mezi takové modifikace patří ABS-T, které má menší teplotní roztažnost, a tudíž nedochází k tak velkému rozdílu teplot na tisknutém modelu. [1]



Materiály ABS lze snadno upravovat ještě po vytištění, a to broušením, lakováním a leptáním. [11]

Pro veškeré zkoušky byl v práci použit materiál ABS-M30. Ten je vhodný pro výrobu mechanických dílů a jeho vlastnosti jsou velice podobné dílům, které jsou vstřikovány do forem. Mechanické vlastnosti materiálu jsou zaneseny do tabulky 1. [11]

Údaje udané výrobcem pro tisk:

Teplota extruderu: 230 – 250 °C

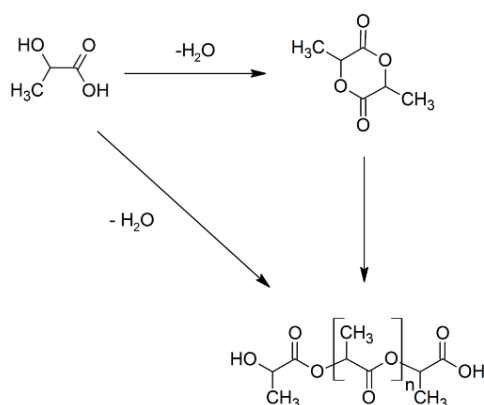
Teplota podložky: 70 – 110 °C

*Tabulka 1 Mechanické vlastnosti materiálu ABS - M30 [12]*

Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638)	Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638)	Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638)	Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790)	Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790)	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
28 – 32	2180 – 2230	1,8 – 8	48 – 60	1760 – 2060	1,03

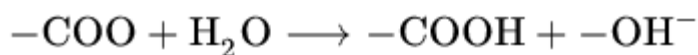
### 3.2 PLA (POLYLACTID ACID)

Polylactid acid je termoplastický polyester, který je dnes nejpopulárnějším materiálem na tisk, a to zejména díky tomu, že ho lze nejsnadněji tisknout. Tento materiál se získává z obnovitelných zdrojů, zejména z kukuřičného škrobu. Vyrábí se enzymatickou hydrolýzou glukózy, ze které je poté fermentací získávána kyselina mléčná. Kyselina mléčná se speciální polymerizací mění na polymléčnou kyselinu. Vláknو se dále vyrábí z taveniny polymléčné kyseliny, a to suchým nebo i mokrým zvlákňováním. Výroba materiálu PLA je zobrazena na Obr. 11. [13]



*Obr. 11 Vznik materiálu PLA [13]*

PLA bývá často prodáváno jako biologicky rozložitelný materiál. Tohle tvrzení je sice pravda, ale nedá se rozložit například v klasickém kompostéru, protože k rozložení potřebuje vyšší teploty. Pro likvidaci PLA se používá hydrolýza, při které se štěpí esterové skupiny hlavního řetězce, čímž se snižuje molekulová hmotnost. Hydrolytická reakce je zobrazena na Obr. 12. [13] [2]



*Obr. 12 Hydrolytická reakce [13]*

Jak bylo zmíněno, tak materiál PLA vyniká skvělou tisknutelností. Je to způsobeno tím, že má malou teplotní roztažnost, a proto se dá tisknout i bez vyhřívané podložky. Materiál je tvrdší než ABS, a tudíž se hodí i na konstrukční díly. Velkou nevýhodou tohoto materiálu je nízká teplotní odolnost, díky které k deformaci dochází už kolem 60°C. Další nevýhodou je špatná odolnost proti UV záření. PLA se také dočkalo svých modifikací, aby byla zajištěna větší teplotní stálost při vyšších teplotách. Přesně pro tento případ vzniklo ST-PLA. Tento materiál je upraven tak, aby vydržel i vyšší teploty než klasické PLA. Tepelná odolnost PLA se dá zlepšovat například žiháním v horkovzdušné troubě. PLA je rozpustitelné v řadě rozpouštědel. Nejvíce používané rozpouštědlo je Ethylacetát, protože ho lze lehce koupit a při jeho použití nehrozí téměř žádná rizika. Mechanické vlastnosti jsou zaneseny do tabulky 2. [2] [3]

Údaje udané výrobcem pro tisk:

Teplota extruderu: 180 – 220 °C

Teplota podložky: 0 – 60 °C

*Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu PLA [14]*

<b>Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638)</b>	<b>Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638)</b>	<b>Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638)</b>	<b>Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790)</b>	<b>Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790)</b>	<b>Hustota [g/cm<sup>3</sup>]</b>
26 – 48	2539 – 3039	1 – 1,5	48 – 84	2470 – 2930	1,24

### 3.3 PET-G (POLYETHYLENTEREFTALÁT)

Tento materiál je kompromis mezi PLA a ABS. Vyniká snadným tiskem, který je jen o trochu horší než u PLA a je skoro stejně teplotně odolný jako ABS. Jedná se o glykolem modifikovaný polyetylenetereftalát. Používá se hojně na výrobu PET lahví. [15]

Hlavní výhodou tohoto materiálu je jeho malá teplotní roztažnost, díky které nedochází k deformaci prvku a odlepování od podložky. Tento materiál je rovněž velmi odolný proti chemikáliím a je velice složité ho leptat. PET-G je o něco pružnější než ABS a PLA. Materiál je vhodný na použití v potravinářském průmyslu na výrobu dóz, odměrek apod. [15]

PET-G je prodáváno v různých modifikovaných kombinacích. Díky své všestrannosti se do něj přidávají i části uhlíkových vláken, aby byla zvýšena pevnost a jeho mechanická odolnost. Lze do něj přidat i samozhášivá aditiva a tím vzniká samozhášivý materiál. Mechanické vlastnosti materiálu PET-G jsou zaneseny do tabulky 3. [15]

Údaje udané výrobcem pro tisk:

Teplota extruderu: 220 – 240 °C

Teplota podložky: 50 – 80 °C

*Tabulka 3 Výrobcem udávané parametry PET-G [15]*

	Metoda testování	Jednotka	Obvyklá hodnota
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	MPa	1880
Hustota	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,27
Nárazová pevnost	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	11
HDT	ISO 75	°C	70

### 3.4 HIPS (POLYSTYREN)

Hips je materiál, který se hojně využívá jako podpůrný materiál, a to hlavně ve spojení s ABS. Využívá se hlavně potravinářském a obalovém průmyslu a jedná se o polystyrén s přídavkem kaučuku. Jedná se o velmi houževnatý a pevný termoplast, který má i dobrou teplotní stálost. Jako podpůrný materiál se používá, protože je rozpustný v lemonsolu. Má podobné vlastnosti, jako materiál PVA, který je rozpustný ve vodě, ale má menší teplotní roztažnost, a tudíž je vhodnější na podpory než PVA. Hips je jeden z materiálů, který špatně snáší UV záření, a proto by neměl být výtisk vystavován přímému slunečnímu záření. Dlouhodobé vystavení slunečnímu záření způsobuje změnu barvy, deformaci ve směru vnitřního pnutí a vznik křezru. Parametry materiálu lze najít v tabulce č.4. [24]

Údaje udané výrobcem pro tisk:

Teplota extruderu: 235 - 250 °C

Teplota podložky: 90 – 120 °C

Tabulka 4 Mechanických vlastností materiálu HIPS [24]

Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638)	Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638)	Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638)	Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790)	Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790)	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
26	2000	1 – 1,5	40	2100	1,05

### 3.5 ASA (AKRYLONITRIL-STYREN-AKRYL)

ASA jako materiál vznikl hlavně jako náhrada ABS, ale dnes už se jedná o materiál, který si najde své místo i tam, kde se zrovna nenahrazuje ABS. Má velice dobré vlastnosti, co se týče odolnosti proti povětrnostním vlivům a UV záření. Další výhodou je tuhost, mechanická odolnost, tepelná odolnost a jednoduchost na tisk. ASA je rozměrově stálá i při dlouhodobém vystavení vyšším teplotám. ASA je vhodná pro výrobu konstrukčních prototypů, a to hlavně ve strojírenství. Nevýhodou je například horší tisk oproti PLA, kvůli obsahu styrenu, který při tisku větších součástí způsobuje deformaci celého tištěného objektu. Parametry materiálu lze najít v tabulce č.5. [25]

Údaje udané výrobcem pro tisk:

Teplota extruderu: 235 - 250 °C

Teplota podložky: 90 – 120 °C

Tabulka 5 Mechanických vlastností materiálu ASA [25]

Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638)	Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638)	Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638)	Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790)	Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790)	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
47	1726	35	45	1926	1,08

### 3.6 ONYX (NYLON CARBON FIBER)

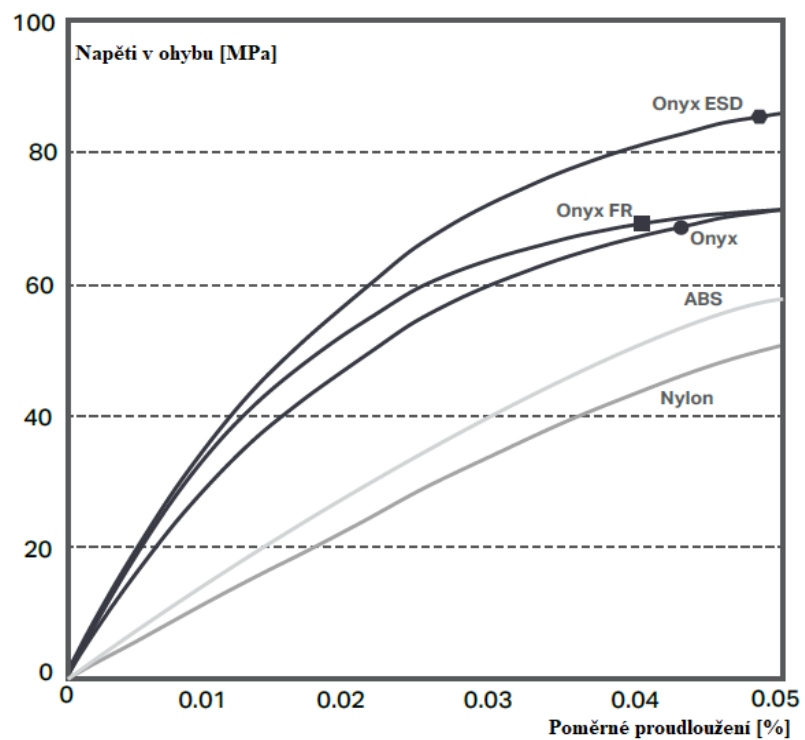
Onyx je materiál, který se používá u průmyslových tiskáren Markforged. Tento materiál je vyroben z nylonu, který je doplněn o nasekaná karbonová vlákna. Jedná se o materiál pro tuhé a přesné výtisky. Samostatně je 1,4x pevnější než klasické ABS. Tento materiál je specifický, protože se do něj dá vložit vlákno, které zlepšuje jeho vlastnosti. Nejběžnější vlákna, které se vkládají do tohoto materiálu jsou kevlar, skelné vlákno, HSHT vlákno a karbonové vlákno. V grafu č. 1 a 2 lze vidět porovnání všech možností materiálů v závislosti napětí v ohybu na poměrném prodloužení. Při použití karbonového vlákna je dosaženo 6x větší pevnosti a 18x větší tuhosti než u použití klasického onyxu bez vlákna. Onyx vyztužený karbonovým vláknem se používá jako náhrada prvků vyrobených z hliníku. Parametry tohoto materiálu jsou zobrazeny v tabulce č. 6. Specifikace dalších materiálů jsou zobrazeny v tabulce č. 7. [16]

Tabulka 6 Mechanické parametry materiálu ONYX s karbonovými vlákny [17]

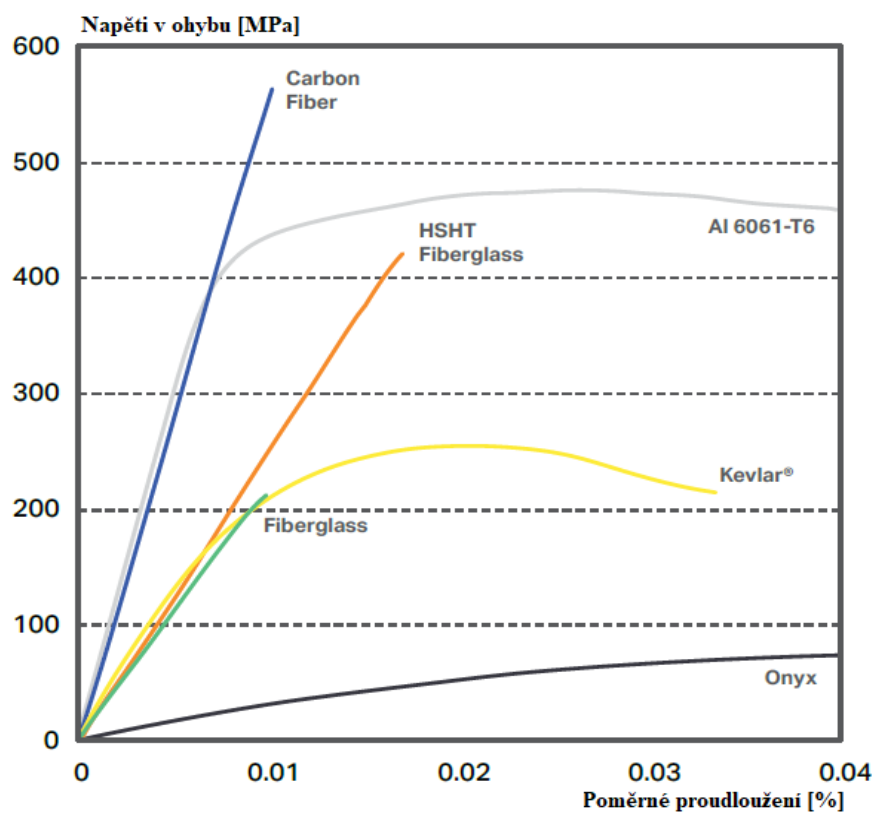
ONYX s karbonovým vláknem	
Zkouška ASTM	Naměřené hodnoty
Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638)	800
Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638)	60 000
Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638)	1,5
Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790)	540
Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790)	51 000
Prohnutí při přetržení v ohybu [%] (ASTM D790)	1,2
Pevnost v tlaku [MPa] (ASTM D6641)	320
Modul komprese [MPa] (ASTMA D6641)	54
Hustota materiálu [g/cm <sup>3</sup> ]	1,4

Tabulka 7 Parametry a popis materiálů zanesených do grafů [17]

Materiál	Pevnost v ohybu [MPa]	Popis
ONYX	71	Nylon plněný mikro částicemi uhlíkových vláken
ONYX FR	71	ONYX doplněný o aditiva, která zapříčiňují samozhášivost dle UL94 V-0
ONYX ESD	83	ONYX pro antistatické použití
NYLON	50	Nylon
Carbon fiber	540	ONYX doplněný o karbonové vlákno
HSHT fiberglass	420	ONYX doplněný o skelné vlákno pro aplikace při vysokých teplotách
Kevlar	240	ONYX s kevlarovým vláknem
Fiberglass	200	ONYX se skleněnými vlákny



Graf 1 Závislost napětí v ohybu na poměrném prodloužení materiálu bez výztuže [17]



Graf 2 Závislost napětí v ohybu na poměrném prodloužení materiálu s výztuží [17]

### 3.7 VYSOKOPEVNOSTNÍ RESIN RIGID (PRYSKYŘICE)

Kapalné materiály používané pro SLA tisk se běžně označují jako „pryskyřice“ a jsou to termosetové polymery. Na trhu je komerčně dostupná široká škála pryskyřic, které mají různé vlastnosti. Vlastnosti materiálu se liší podle konfigurace složení. Mohou být pružné nebo tvrdé, vyplněné sekundárními materiály (např. sklo, keramika) nebo mohou být odolné proti různým vlivům (např. vysoká teplota, odolnost proti nárazu). Pryskyřice je možné zařadit do následujících kategorií

- Standardní pryskyřice pro obecné prototypování
- Technické pryskyřice pro specifické mechanické a tepelné vlastnosti
- Zubní a lékařské pryskyřice, pro certifikaci biokompatibility
- Odlévatelné pryskyřice, které nezanechávají zbytky popela po vypálení v peci. Vysokopevnostní pryskyřice Rigid je plněna skelnými vlákny, které zajišťují dostatečnou tvrdost. Využití najde hlavně u přesných průmyslových dílů jako jsou např. ozubená kola. Parametry materiálu lze najít v tabulce č.8. [17]

*Tabulka 8 Mechanické vlastnosti materiálu resin Rigid [18]*

<b>Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638)</b>	<b>Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638)</b>	<b>Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638)</b>	<b>Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790)</b>	<b>Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790)</b>
55	7 500	2	84	6 000

## 4. AUTOMOTIV A 3D TISK

Není tomu ani pár let, kdy se dostala AV do automobilového průmyslu a už teď je nepostradatelnou výrobní technikou. Hlavně díky 3D tisku se otevřely dveře pro novější a robustnější designy. S nástupem 3D tisku se začaly vyrábět lehčí, pevnější, ale i bezpečnější díly. Díky tomu se zkrátily dodací lhůty a také se mnohdy snížily náklady. V roce 2015 výroční zpráva Wohlers uvádí, že automobilový sektor užíval celosvětově 16,1 % celé AV. [19]

I když se 3D tisk používá stále více, tak podíl dílů vyrobených na automobily nepřesahuje ani 1 %. Z toho vyplývá, že 3D tisk nenahrazuje žádnou ze současných metod, ale rozšiřuje možnosti výroby.

Toto rozšíření má ale obrovský vliv na celý automobilový sektor. Nejvíce aditivní technologie ovlivnily vývoj a výzkum. V dnešní době se celý automobilový sektor otáčí k čisté energii, a to buď k elektřině, anebo k vodíku. Bohužel výrobky pro tyto technologie jsou nové a je nutné je buď vyrábět úplně od nuly, nebo značně upravovat. A tady se dostává na řadu aditivní výroba. AV je nejvhodnější metodou na výrobu prototypů a dílů na testy. Tímto procesem se vývoj značně urychlí a je možné předběhnout konkurenci. [19]

Další segment v automobilovém průmyslu je design. Design automobilu často vzniká nejprve jako zmenšený model na předvádění podoby vozidla. Často se tyto modely používají k aerodynamickým zkouškám. Pro výrobu modelů se používají hlavně SLA tiskárny, ale pro detailnější modely, které mají být plně probarvené, se využívá metoda Binder Jetting. Modely jsou velice přesné a umožňují jasně sdělit záměr návrhu a předvést celkovou podobu konceptu. [19][2]

U modelů se ovšem nezůstává a stává se běžnou praxí, že díly vyrobené AV se přenesou až k reálnému konceptu celého auta. Tisknou se zrcátka automobilů, přítlačná křídla, a to nejčastěji metodou FDM. Prvky se tisknou i do interiéru, kde mnohdy vzniknou celé palubní desky s vysokými detaily a probarvením. Některé díly neslouží jen jako ukázka na veletrhy, ale slouží k testům k ověřování výkonu prototypu.

Když bylo zmíněno, že aditivní výroba je spíše dodatek ke stávajícím metodám, tak to neplatí u výroby rychlých a levných nástrojů, forem pro vstřikování a tvarování za tepla. V automobilovém průmyslu to umožňuje rychle vyrábět nástroje s nízkými náklady, a poté je použít k výrobě malých a středních sérií dílů. Tyto technologie snižují riziko při investování do forem na vstřikování, protože některé nedostatky se projeví až při zhotovení formy. [19]

Zatím bylo zmíněno vše okolo vývoje a úspory finančních prostředků, ale aditivní technologie se používají i pro výrobu určitých prvků. Nejčastěji se jedná o malé série, a tudíž ani nevadí finanční stránka aditivních technologií. Největší využití nachází u automobilů vyšší třídy, které se vyrábí maximálně v desítkách kusů.

Všechny dnešní automobilky již mají ve svém provozu implementovanou aditivní výrobu a jen díky tomu se vývoj zrychluje a je levnější než před lety. [19]



## **4.1 POŽADAVKY NA AUTOMOBILOVÉ DÍLY**

V této podkapitole je rozebráno, jaké aspekty ovlivňují výrobu komponentů pro automobily. Dále je zde zpracována tabulka, jaké prvky lze vyrobit a jaké technologie se na danou problematiku hodí. Podkapitola má ukázat, jak 3D tisk usnadňuje výrobu a rozšiřuje možnosti výroby. Přehled vyráběných dílů pro automobilový průmysl je zanesen do tabulky 9.

### **4.1.1 HMOTNOST**

Jedním z nejdůležitějších aspektů, týkající se automobilového průmyslu, je snížení hmotnosti komponentů, protože čím více se zmenší hmotnost automobilu, tím méně paliva spotřebuje. Do automobilu se pak mohou použít slabší motorizace nebo motorizace, které jsou upraveny, aby splňovaly emisní limity. Automobilové aplikace využívají pokročilé konstrukční materiály a složité geometrie ve snaze snížit hmotnost a zlepšit výkon. AV je schopna vyrábět díly z mnoha lehkých polymerů a kovů, které jsou běžné v automobilovém průmyslu a díky topologické optimalizaci snížit hmotnost. [19]

### **4.1.2 SLOŽITÉ GEOMETRIE**

Ovlivnění hmotnosti a aerodynamiky (a tedy výkonu vozidla) se občas neobejde bez složitějších geometrických tvarů, které se nedají vytvořit jinak než aditivní výrobou. Automobilové díly často vyžadují vnitřní kanály pro dokonalejší chlazení, skryté prvky, tenké stěny, jemné sítě a složité zakřivené povrchy. AV umožňuje výrobu vysoce složitých struktur, které mohou být stále extrémně lehké a stabilní. Poskytuje vysoký stupeň svobody designu, optimalizaci a integraci funkcí, výrobu malých sérií za rozumné náklady a vysoký stupeň přizpůsobení produktu i při sériové výrobě. [19]

### **4.1.3 TEPLOTNÍ STÁLOST**

Mnoho automobilových aplikací vyžaduje značné minimum teplotních odchylek. Existuje několik procesů AV, při kterých vznikají prvky, které jsou při správné volbě materiálů schopny vydržet teploty v řádech stovek stupňů celsia, a tudíž jsou vhodné i do motorového prostoru. [19]

### **4.1.4 VLHKOST**

Většina součástí, které se používají při výrobě automobilů, musí být zcela odolná proti vlhkosti, ne-li dokonce vodotěsná. Jednou z hlavních výhod AV je, že všechny tištěné díly lze upravit tak, aby se vytvořila vodotěsná nebo vlhkosti odolná bariéra. Mnoho materiálů je navíc ze své podstaty vhodných pro prostředí s větší vlhkostí. [19]

### **4.1.5 KONSOLIDACE DÍLŮ**

Počet položek v sestavě lze snížit redesignem do jednoho komplexního dílu. Konsolidace dílů je významným faktorem při zvažování toho, jak může aditivní výroba prospět snížení spotřeby materiálu. Konsolidací se také snižuje hmotnost výrobku a z dlouhodobého hlediska i náklady. Tento proces také snižuje zásoby a šetří místo ve skladech. Díky konsolidaci odpadá i práce na smontování výrobků, a tím se šetří další náklady. [19]

Tabulka 9 Souhrn dílů, které lze vyrábět aditivní výrobou

Aplikace	Proces	Materiál	Funkce	Díly
Pod kapotou	SLS	Nylon	Tepelně odolné funkční součásti	Kryt baterie, držák alternátoru, části chladicího okruhu
Interiérové doplňky	SLA	Pryskyřice	Pohledové prvky	Konzoly, rámečky, tlačítka
Vzduchové vedení	SLS	Nylon	Vedení vzduchu ve složitých prvcích karoserie	Chlazení, odvod tepla, klimatizace
Karoserie	SLA	Pryskyřice	Menší díly karoserie srovnatelné se vstřikováním	Části nárazníků, estetické prvky na karoserii, rámečky světlometů
Konzoly, nosné prvky	ADAM, DMLS	Kovový prášek, kovové struny	Kovové nosné a mechanicky namáhané díly	Ramena, nosné prvky dílů motoru, výfukového systému, topologická optimalizace
Interiér	Binder Jetting	Fotopolymerní prášek	Rámečky obrazovek	Rozhraní palubní desky
Světla	SLA	Pryskyřice	Plně transparentní, vysoce detailní modely	Prototypy světlometů
Karoserie	FFF + CFF	Onyx, FR, ESD	Mechanicky namáhané prvky	Nahrazení nosných kovových prvků kompozity

## **5. APLIKACE 3D TISKU V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU**

Tato kapitola pojednává o prvcích, které lze vyrobit aditivní výrobou a o prvcích, které napomáhají výrobě v úspoře na nákladech. Kapitola dále popisuje různé metody výroby ať už se jedná o termoplasty nebo o kovové materiály a přibližuje jejich využití v průmyslu.

### **5.1 SLOŽITÉ POTRUBÍ**

V dnešní době vzniká u elektromobilů problém, a to, že auto není potřeba jen chladit, jako u klasických spalovacích motorů, ale je zde potřeba bateriové obvody i zahřívat. Naskytuje se řešení zhotovení více okruhů, které budou ohřívat baterii a jiné ji budou chladit. Tohle řešení by jen přidávalo váhu automobilu a ubíralo místo, které se dá využít na další baterie. Z tohoto důvodu se využívá 3D tisku k vyhotovení speciální potrubí a směšovačů, které jsou schopny přepínat okruhy a rozdělovat teplo do kabiny, k bateriím apod. Tím je ušetřeno spoustu energie, která se může dál využívat. [20]

Použitím SLS k výrobě nestrukturálních nízkoobjemových potrubí, lze navrhnout vysoce optimalizované, velmi složité jednodílné konstrukce. S SLS je možné navrhovat různé tloušťky stěn a zvyšovat poměr pevnosti k hmotnosti aplikací strukturálně optimalizovaného povrchu potrubí. Pro metodu SLS se nezvedají náklady při zvyšování složitosti a díly se mohou tisknout bez podpor a s vysokou úrovní přesnosti.[19]

### **5.2 VYSOCE DETAILNÍ PROTOTYPY**

Na rozdíl od tradičních metod prototypování jsou některé procesy AV schopny vyrobit vícebarevné vzory s povrchovou úpravou, srovnatelnou se vstřikováním. Tyto modely umožňují návrhářům lépe porozumět tvaru a uložení dílu. Tato vysoce přesná metoda prototypování je také ideální pro aerodynamické testování a analýzu, protože povrchová úprava, které je možné dosáhnout, je často reprezentativní pro finální díl. AV se pravidelně používá k výrobě automobilových komponentů, které se spoléhají na estetiku a funkčnost, což vede k tomu, že se vyrábí vše od zpětných zrcátek a světelných krytů, až po volanty a kompletní designy palubních desek. Material jetting a SLA jsou dvě nejběžnější metody, používané pro estetické prototypy vyrábějící díly z fotocitlivé pryskyřice. [19] [20]

### **5.3 FUNKČNÍ DÍLY**

Schopnost rychle vyrábět složitý a lehký držák přes noc je ochrannou známkou odvětví aditivní výroby. AV umožňuje nejen výrobu organických tvarů a vzorů, za pomoci topologické optimalizace, ale také vyžaduje od operátora velmi malý vstup do procesu. Inženýři jsou schopni rychle převzít návrh z počítače a vyrobit výrobek ve velmi krátkém čase. To není možné u tradičních výrobních technik, jako je CNC obrábění, kde je k výrobě dílů zapotřebí vysoce kvalifikovaného operátora a velice drahé stroje. Technologie fúze s práškovým ložem, jako je metoda SLS, využívá k takovému tisku materiály od nylonu až po kovový prášek. [19] [3]

## 5.4 VÝROBA FOREM PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Vstřikování plastů je nejběžnější metodou hromadné výroby plastových dílů. Je ideální pro rychlou výrobu velmi velkého počtu identických dílů s malými tolerancemi.

V minulosti se 3D tisk v konstrukčním a výrobním procesu používal pouze k vytváření a ověřování prototypů, které by později byly vstřikovány. V dnešní době technologický vývoj v oblasti přesnosti tiskáren, povrchových úprav a materiálů posunul tak, že umožňuje 3D tiskárnám také přímo vyrábět formy. [20] [21]

Vstřikování se sestává z vytváření komponent za pomoci vstřikování roztaveného materiálu do formy. Materiál vyplňuje dutiny formy, a když se ochladí, ztuhne, a má formu matrice. Potom se matrice otevře, pevná část se vysune a proces se opakuje. Automatizace tohoto procesu může přinést velmi vysoké výrobní rychlosti. Materiály, běžně používané při vstřikování, jsou termoplastické polymery, ale je možné lisovat i určité reaktoplasty. [21][2]

Vysoké počáteční náklady, spojené se vstřikováním, činí tuto technologii nákladově efektivní pouze při vysokých objemech. Tyto náklady se mohou pohybovat mezi 10 000 až 100 000 USD a jsou spojeny s velmi vysokými požadavky na konstrukci a výrobu vstřikovacích forem. Z tohoto důvodu se vstřikování obvykle používá pouze k výrobě velmi vysokých objemů identických dílů za nízkou cenu. Typický běh může zahrnovat výrobu tisíců nebo někdy milionů komponent. [21]

Termín vstřikování s nízkým počtem výrobků se obvykle vztahuje na série od 10 do 100 dílů. Tradičně tak malé série nejsou ekonomicky výhodné, kvůli velmi vysokým nákladům, spojeným s výrobou vstřikovací formy. Tady na řadu přichází 3D tisk. [21]

U výroby forem pro malé série již není odolnost proti opotřebení tím nejdůležitějším faktorem, protože během vytvoření pár výrobků, se formy až tak neopotřebují. Některé technologie, jako je Material Jetting a SLA, jsou schopné vyrábět formy s vysokou přesností a vynikající povrchovou úpravou. Když je přesnost spojena s moderními tepelně odolnými tiskovými materiály, tak je umožněna výroba forem při svobodě designu. Tištěné formy jsou skvělou volbou pro výrobu vstřikovacích forem pro malé série. Umožní také rychlé ověření konstrukce formy, což snižuje finanční riziko investování do drahé kovové formy. [2]

Výhodou tištěných forem je doba jejich zhotovení, která se pohybuje okolo 1 až 2 týdnů. [2][21]

3D tištěné vstřikovací formy se vyrábějí ve 2 standardních konfiguracích, a to jako vložky forem v hliníkových rámech, anebo jako samotné formy.[21]

### 5.4.1 SLA PRO VÝROBU FOREM S HLINÍKOVOU VÝSTUHOU

Forma je vtištěna na SLA tiskárně a poté je vložena do tuhých hliníkových rámců, které poskytují podporu proti prohýbání formy při vstřikování. Hliníkové rámy také pomáhají předcházet deformaci formy po opakovaném použití. Pro výrobu takové formy je nejlepší metoda SLA nebo Material Jetting. Technologie tisku je ale jen polovina problému, protože se musí zvolit i kvalitní materiály, jako jsou například vysokoteplotní pryskyřice Formlabs nebo Stratasys Digital ABS. [21]

### 5.4.2 SLA PRO VÝROBU FOREM

V této konfiguraci je forma plně vytištěna a nepoužívá se pevný hliníkový nosný rám. Tímto způsobem lze do formy integrovat složité chladicí kanály, a to má za důsledek daleko přesnější a účinnější chlazení. Formy vyrobené pomocí tohoto přístupu vyžadují více 3D tiskového materiálu, což zvyšuje pořizovací cenu a jsou náchylnější k deformaci po vícenásobném tisku. [21]

## 5.5 KOVOVÉ DÍLY

První metodou výroby kovových dílů je odlévání, na které se používají hlavně FDM tiskárny, díky kterým se vyrobí forma pro odlévání. Formy zhotovené touto metodou mají mnohdy lepší vlastnosti než formy vyrobené klasickými metodami. K procesu klasického odlévání se tradičně používají voskové vzory, protože mají dobré vlastnosti pro dokonalé vyhoření bez zbytků. Tyto voskové vzory se vytváří nejčastěji pomocí CNC stroje, který je vyrábí z voskového bloku. Když se jedná o větší série, tak se zhotovují matrice a vzory se vyrábí odléváním vosku pomocí matrice. Tato technologie je velmi nákladná a je zapotřebí mít speciální vybavení určené pro jednu činnost. Další nepříjemností je čekací doba na matrici, která může být klidně i několik týdnů. Díky těmto nevýhodám se začal k odlévání využívat 3D tisk. [22]

### 5.5.1 TECHNOLOGIE DMLS PRO TISK KOVOVÝCH DÍLŮ

DMLS je technologie využívající práškové lože, které se používá k výrobě kovových dílů s vysokou úrovní rozměrové přesnosti. Svobodu designu, kterou nabízí DMLS si oblíbila spousta firem a podniků v řadě průmyslových odvětvích (automobilový a letecký průmysl), kde je zásadní optimalizace hmotnosti a výkon (náklady na provoz komerčního letadla jsou zhruba 1 000 EUR / kg, což znamená, že jakákoli úspora hmotnosti má za následek významnou úsporu provozních nákladů). Takové úspory přinesly v průmyslových odvětvích ochotu zaplatit vysoké náklady na 3D technologie. Vždy je vhodné porovnat náklady na poskytovatele služeb 3D tisku a nákupu vlastní 3D tiskárny na kov. [22]

Technologie DMLS může vyrábět díly z široké škály kovů, včetně hliníku a nerezové oceli, ale i exotických biokompatibilních materiálů používaných ve stomatologii a lékařství, jako je titan. Hlavními omezeními DMLS jsou vysoké náklady, malá velikost tiskového prostoru a dlouhé dodací lhůty ve srovnání s jinými technologiemi 3D tisku. Díly také vyžadují podpurný materiál, aby se omezila pravděpodobnost zkreslení a deformace, a tudíž je u této metody zdoluhavý dokončující proces, při kterém se musí odstranit podpory, což zvyšuje dobu a náklady na výrobek. [22]

### 5.5.2 SLA A FDM PRO DOLEVÁNÍ

Tato technologie je daleko častější než DMLS, protože je daleko levnější a materiál ve formě resinu stojí desetinu toho, co materiál do DMLS tiskárny. Bohužel resin není jediný výdaj pro výrobu kovových dílů touto metodou, jelikož vytvořením 3D objektu celý proces začíná. Po vytvoření výtisku je celý výtisk ponořen do keramické kaše s jemnou směsí oxidu křemičitého. To se několikrát opakuje, až je výtisk pokryt dostatečnou vrstvou, aby vrstva na výtisku vydržela teplotu pece a to až 1600 °C. V peci se spálí 3D výtisk a zůstane jen forma. Forma se po vytažení z pece propláchne a může

se do ní nalít roztavený kov. Po zchlazení kovu může dojít k rozbití formy ve vibračním zařízení. Výsledný prvek jde ještě opracovat běžnými obráběcími metodami pro vylepšení povrchu.

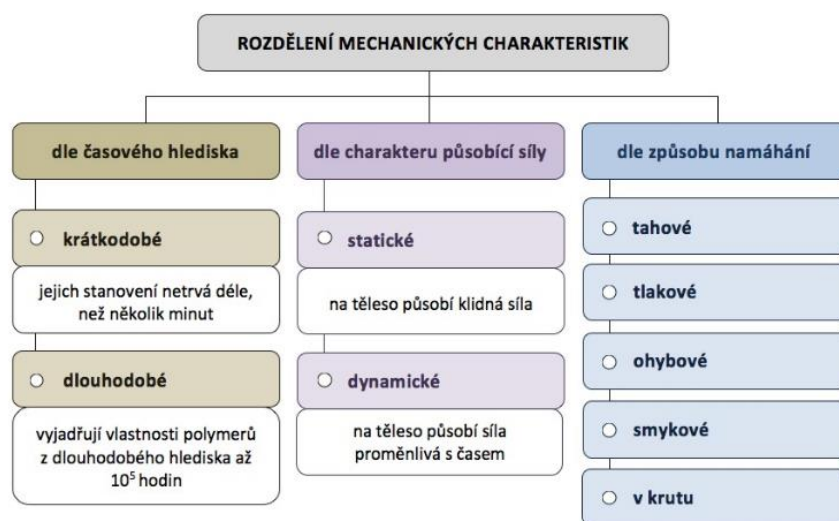
Hlavním omezením SLA/DLP je velikost formy, která jde zhotovit. U větších kovových dílů je lepší zvolit metodu FDM, protože 3D tisk je nákladově efektivnější, levnější a rychlé řešení. [22]

## 6. MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ A JEJICH CHARAKTERISTIKY

Mechanické vlastnosti polymerů nám popisují, jak se materiál chová, když je mechanicky namáhán. Známe čtyři praktické zkoušky, a to jsou pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. [23]

- Pružnost, nebo také elasticita, je schopnost pružně deformovat pod účinkem vnějších sil. Při pružné deformaci se z fyzikálního hlediska mění objem deformovaného tělesa. Když se jedná o objemovou změnu, tak se popisuje změna vratná. Existuje ještě druhá deformace, a to je deformace plastická, která je pro mechanické části nežádoucí. Ta je nevratná.
- Plasticita popisuje deformace materiálu pod vnějším tlakem, která způsobí změnu tvaru, ale nezpůsobí změnu objemu. Když dojde ke tvarové změně, tak nastává nevratné poškození. Jsou známy dvě plastické deformace, a to plasticita časově závislá a plasticita časově nezávislá.
- Pevnost hovoří o odolnosti materiálu. Tato odolnost materiálu popisuje, jak se chová materiál proti plastické deformaci nebo trvalému porušení soudržnosti částic. Proces se nazývá porušování, které zapříčiňuje šíření trhliny až do lomu materiálu.
- Houževnatost je vlastnost materiálu, která určuje absorbování energie před dosažením mezního stavu. Opačná vlastnost houževnatosti je křehkost.

Pro popis mechanických charakteristik je nutné si uvědomit, že se nejedná o konstanty, ale o veličiny. Tyto veličiny jsou závislé na tvarech a vyhotovení zkušebních těles, ale také na podmínkách zkoušky. Pro experimenty jsou vyrobena zkušební tělesa, na kterých je zkoušeno působení vnějších sil. Materiálové charakteristiky jsou uváděny v materiálových spisech. Tyto charakteristiky jsou vytvořeny pomocí normovaných zkušebních těles. Tato tělesa se vyrábí lisováním, vstřikováním, anebo obráběním. Mechanické charakteristiky lze vidět na obr. č. 13. [23]



Obr. 13 Schéma rozdělení mechanických charakteristik [23]

Vzhledem ke struktuře polymerů, se chování popisuje velice špatně, protože na vnější namáhání reagují oběma složkami deformace, a to pružnou, plastickou a deformací zpožděně elastickou. Při tzv. tenčení za studena dochází u houževnatých polymerů za standardní teploty a při stálém zatížení k deformaci (plastické i elastické), která s časem roste. Tato vlastnost se odborně nazývá kríp. Při popisu celé zkoušky lze tvrdit, že z krátkodobého hlediska se polymer chová jako pevný materiál, ale z dlouhodobého hlediska je jeho deformace větší a materiál je poddajný. Existuje také pojem zpětný kríp, který popisuje, jak se chová těleso po skončení působení napětí. Zdeformované těleso má tendenci se vrátit do nedeformovaného stavu. Kríповé a zpětně kríповé procesy značně ovlivňují životnost dílů. [23]

Při popisování chování polymerů musíme dbát na to, zda se jedná o charakteristiky krátkodobé, nebo dlouhodobé, protože krátkodobé charakteristiky mají jen informační charakter. Praktický význam mají pouze dlouhodobé zkoušky, a proto se jejich výsledky používají na konstrukční výpočty.

## 6.1 ZKOUŠKA TAHEM

Jako nejzákladnější mechanické charakteristiky se považují tahové charakteristiky. Těleso je při této zkoušce vystaveno jednoosému namáhání v tahu. Díky této charakteristice je možné sledovat průběh deformace. Důležité informace o průběhu zkoušky nám popisuje deformační křivka, která popisuje závislost poměrného prodloužení na normálovém napětí. Zkouška probíhá tak, že se uchytí zkoušený prvek do čelistí testovacího stroje a nasadí se na něj průtahoměr. Při zkoušce se musí zaznamenávat závislost působící síly na poměrném prodloužení. [23] [3]

### 6.1.1 VÝPOČTY PRO MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY

- **Mez pevnosti v tahu ( $R_m$ ) [23]**

Jedná se o smluvní napětí, odpovídající největší síle ( $F_{max}$ ), která byla při průběhu zkoušky naměřena.

$R_m$  – mez pevnosti v tahu [MPa]

$F_{max}$  – maximální zatížení v tahu [N]

$S_0$  – počáteční průřez zkušebního tělesa [mm<sup>2</sup>]

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

- **Napětí na mezi kluzu ( $R_e$ ) [23]**

Označuje horní hranici napětí, která definuje přechod mezi elastickou a plastickou deformací. Po této hranici vznikají trvalé deformace.

$R_e$  – napětí na mezi kluzu [MPa]

$F_e$  – zatížení [N]

$S_0$  – počáteční průřez zkušebního tělesa [mm<sup>2</sup>]

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$



- **Kontrakce (Z) [23]**

Jedná se o trvalé zmenšení průřezu po přetržení vzorku. Kontrakce se udává v procentech.

$Z$  – kontrakce [%]

$\Delta S$  – je rozdíl počátečního a vzniklého průřezů [ $\text{mm}^2$ ]

$S_0$  – je počáteční průřez zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

$S_1$  – je konečný průřez zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 [\%], Z = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

- **Poměrné prodloužení (Tažnost) [23]**

Tento jev pojednává o podélné deformaci (%)

$A$  – tažnost [%]

$\Delta L$  – absolutní prodloužení [N]

$L_0$  – počáteční délka zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

$L_1$  – konečná délka zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 [\%], A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

- **Modul pružnosti (E) [23]**

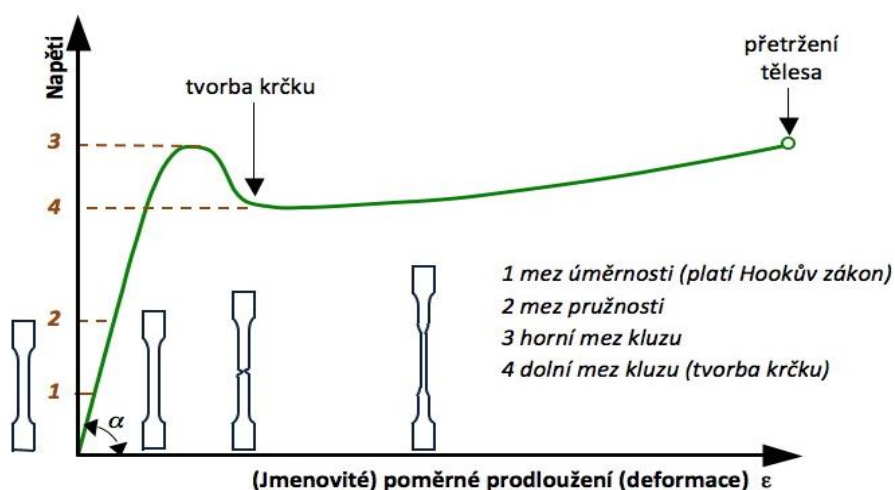
Jedná se o mechanickou charakteristiku, která vyjadřuje tuhost materiálu. S rostoucím modulem pružnosti roste i tuhost materiálu. Popisuje ho závislost Napětí ( $\sigma$ ) na relativním prodloužení ( $\varepsilon$ ). Tuto závislost vyjadřuje Hookův zákon. Hookův zákon platí jen v lineární části charakteristiky, která popisuje ještě vratnou deformaci. Graf deformace lze vidět na obr.č.14. a obr.č.15.

$E$  – modul pružnosti [MPa]

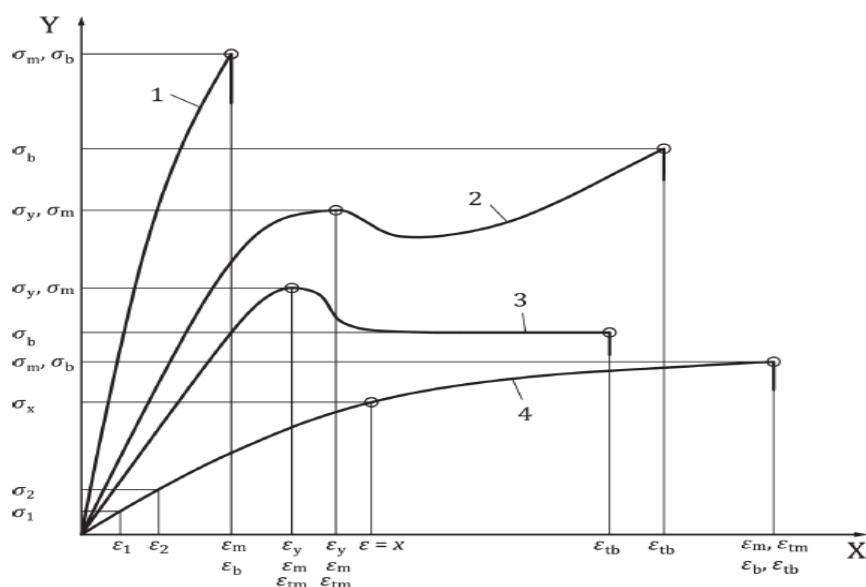
$\varepsilon$  – relativní prodloužení [mm]

$\sigma$  – napětí [MPa]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [\text{MPa}] \quad (5)$$



Obr. 14 Graf zobrazující deformaci tělesa [23]



Obr. 15 Typické křivky napětí/poměrné prodloužení [26]

Tabulka 10 Legenda pro obr. 15 typické křivky napětí/poměrného prodloužení [26]

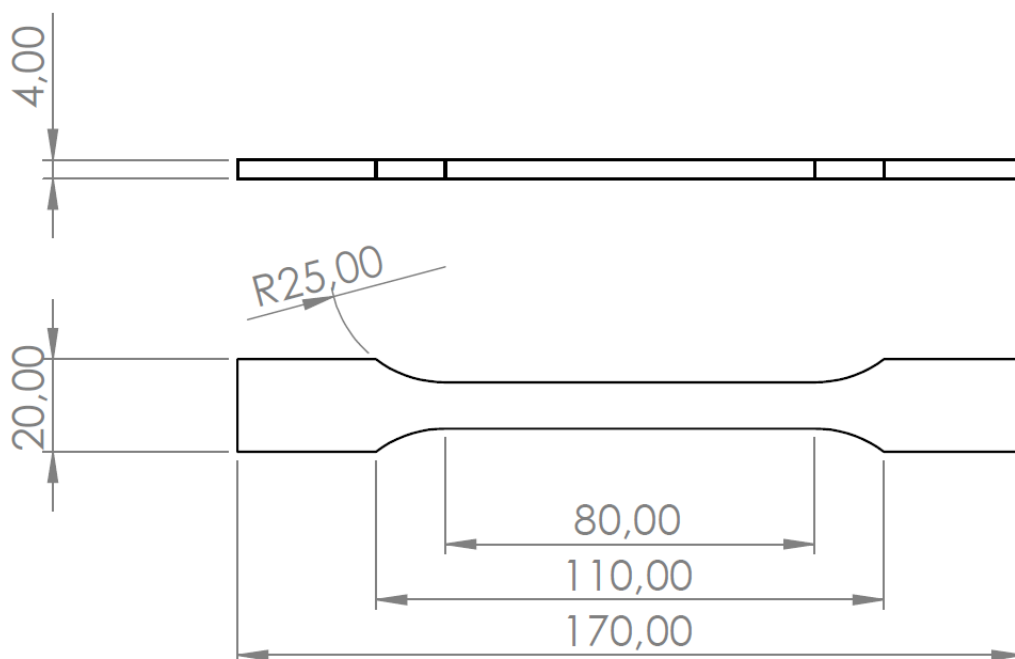
X	Poměrné prodloužení/nebo jmenovité poměrné prodloužení
Y	Napětí
1	Křivka (1) představuje křehký materiál, vykazující porušení bez meze kluzu při nízkých poměrných prodlouženích. Křivka (4) představuje měkký materiál podobný pryži, vykazující porušení při vyšších poměrných prodlouženích (> 50 %).
2, 3	Křivky (2) a (3) představují materiály, které mají mez kluzu s rostoucím napětím (2) a bez rostoucího napětí (3) za meze kluzu. Křivky (2) a (3) jsou křivkami „napětí vs. poměrné prodloužení“ do meze kluzu a „napětí vs. jmenovité poměrné prodloužení“ za meze kluzu.
4	Křivka (4) může být buď napětí vs. poměrné prodloužení, nebo napětí vs. jmenovité poměrné prodloužení v závislosti na použitém zkušebním zařízení

## 7. ZAŘÍZENÍ A ZKUŠEBNÍ TĚLESA PRO PŘÍPRAVU PRAKTICKÉ ČÁSTI

V této podkapitole je popsáno, jaká zkušební tělesa byla zvolena pro prováděné testy a jak byla tato zkušební tělesa navržena a vyrobena. Dále je zde popsáno, jak byly zkušební tělesům vylepšovány vlastnosti žiháním za pomoci vysoušecí pece.

### 7.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Výroba zkušebních těles pro patřičné zkoušky musí odpovídat normě, která dané zkoušky popisuje. Norma, která by se zabývala zkouškami pro potřeby 3D tisku neexistuje, a tudíž byla zvolena norma, která stanovuje tahové vlastnosti pro tvářené plasty, a která by se nejvíce měla přibližovat právě dílům tvořených na 3D tiskárně. Jedná se o normu pod označením ČSN EN ISO 527-2, z které bylo vybráno zkušební těleso typu 1A. Toto těleso je zobrazeno na Obr.16. Těleso bylo vymodelováno v programu SolidWorks a posléze převedeno do formátu STL. Formát STL byl vložen do sliceru CURA, kde byly nastaveny parametry na tisk a vytvořen G-code, který se za pomoci SD karty vložil do tiskárny. [27]



Obr. 16 Zkušební těleso 1A dle normy ČSN EN ISO 527-2 [27]

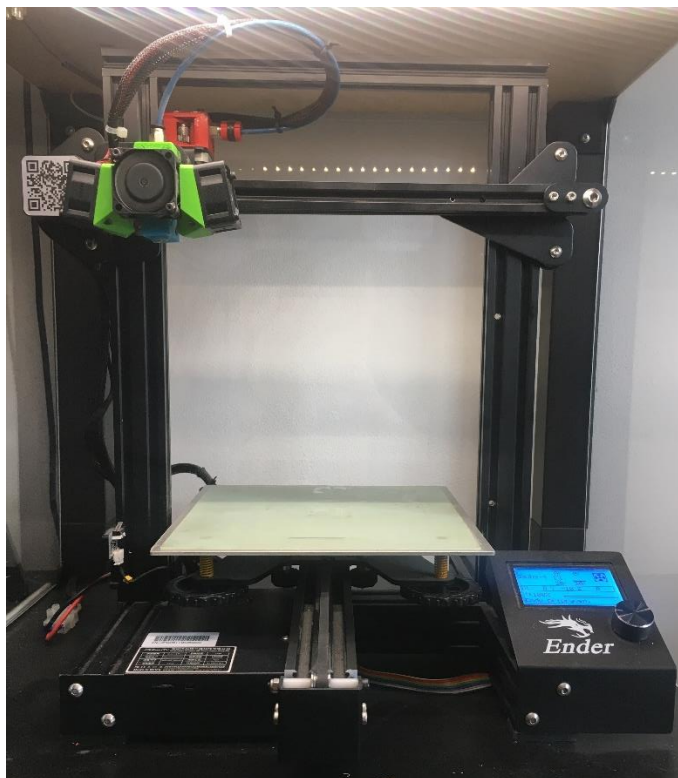
## 7.2 TISKÁRNY PRO VÝROBU ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro výrobu zkušebních těles, pro následné testy v klimatické komoře, byla zvolena technologie FMD, která byla pro patřičné testy nejvhodnější. Výroba zkušebních těles probíhala na dvou zařízeních, a to na modifikované stavebnici Ender 3PRO a na zařízení vlastní výroby, pracovně nazvané A8. Výroba musela probíhat na dvou zařízeních, protože jedno zařízení je uzpůsobeno na tisk tvrdších materiálů, které mají velkou teplotní roztažnost.

### 7.2.1 TISKÁRNA ENDER 3 PRO

3D tiskárna Ender 3 Pro, je zařízení pro tisk dílu za pomoci tavení polymerního materiálu principem FDM. Tato tiskárna vychází z principu RepRap tiskáren, které začaly vznikat kolem roku 2010. Tiskárna pochází od čínského výrobce CREALITY, který dodává levné 3D tiskárny do celého světa. Tiskárna byla přestavěna za účelem vylepšení tisku a také pro lepší výběr tiskových materiálů.

Tiskárna je vyrobena z hliníkových profilů, které tvoří největší část nosné konstrukce. Dalšími nosnými prvky jsou pojezdové profily a trapézové šrouby, které zajišťují pohyb, za pomoci krokových motorů a řemenic. Celá tiskárna je přestavěna na 24 V a elektronika byla použita od společnosti BIGTREETECH. Jako řídicí jednotka byla zvolena deska Bigtreotech SKR v1.3 s drivery TMC2209, která zajišťuje přesný a tichý chod tiskárny. Tiskárna je díky provedení bowden vhodná na tisk tvrdších materiálů, a proto byla uzavřena do boxu. Box zajišťuje, aby kolem tiskárny neproudil vzduch, který by způsoboval ochlazování tištěných prvků, které by se následně mohly odlepit od podložky. Takto upravenou tiskárnu může vidět na obr. č.17.

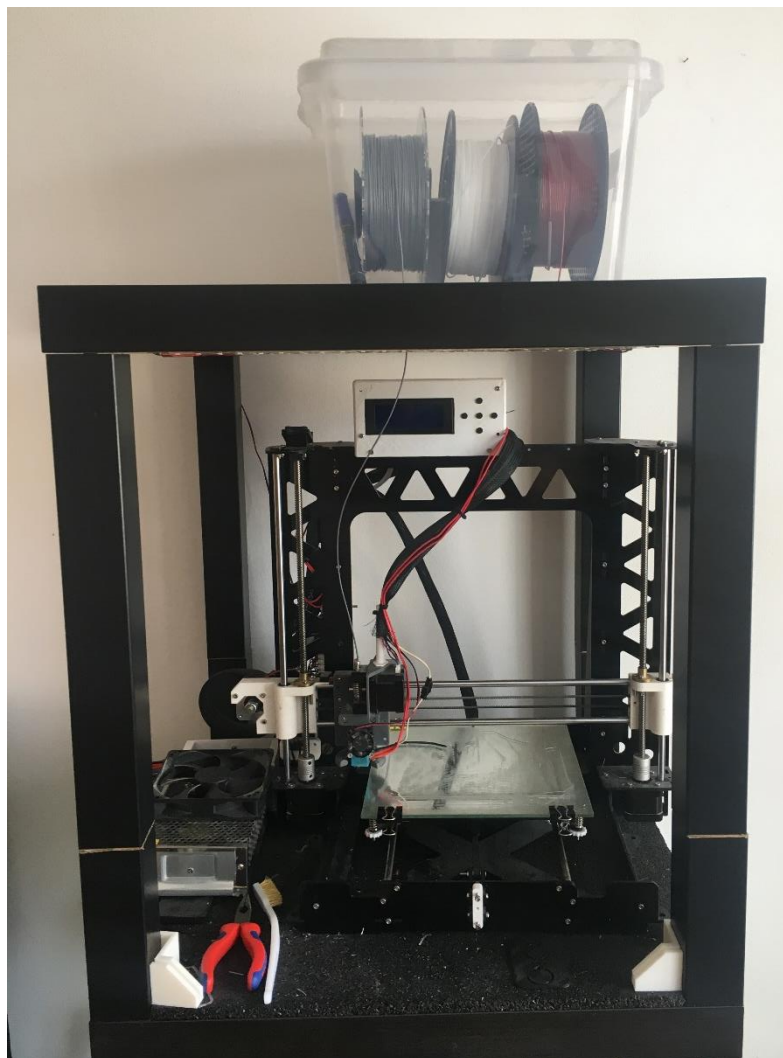


*Obr. 17 Modifikovaná tiskárna Ender 3 PRO*

### 7.2.2 TISKÁRNA A8

Tiskárna A8 je tiskárna vlastní výroby, která vznikla na základech tiskárny ANET A8. Z původní tiskárny nezbylo nic než podobná konstrukce. Tiskárna má jako nosnou konstrukci použit rám z ocelového plechu o tloušťce 5 mm. Tento plech byl vypálen na laseru, dle rozměrů starého rámu na ANET A8. Tato tiskárna má stejnou elektroniku jako Ender 3 Pro, a proto není potřeba dále tuto elektroniku rozebírat.

Výhodou této tiskárny je direct systém podávání filamentu, který je vhodný pro tisk měkčích materiálů, ale i materiálů jako TPE a TPU. Tato tiskárna je díky své tuhé konstrukci schopna tisknout až 120 mm/s, s tryskou o velikosti 0,8 mm. Tiskárna je schopna dosahovat velké přesnosti, a to hlavně v ose Z, díky dvěma krokovým motorům. Dva krokové motory jsou schopné zajistit, aby nedocházelo k ohybu nosných kalených tyčí, po kterých se pohybuje hlava tiskárny. Tiskárnu můžete vidět na obr. č.18 a specifikace tiskáren lze vidět v tabulce 11.



*Obr. 18 Tiskárna vlastní výroby A8*

Tabulka 11 Specifikace FDM tiskáren pro tisk zkušebních těles

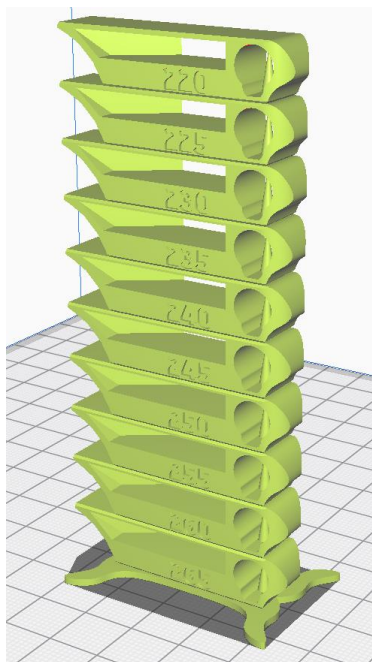
Specifikace	Ender 3 Pro	A8
Konstrukce	hliník	ocel
Hmotnost	5,4 Kg	9,2 Kg
Uzavřený box	ANO	NE
Tloušťka filamentu	1,75 mm	1,75 mm
Podávání filamentu	Bowden	Direct
Tiskový prostor	23 x 23 x 38 cm	24 x 24 x 42 cm
Počet extruderů	1	1
Průměr trysky	0,1-1 mm	0,1-1 mm
Typ trysky	Tvrzená ocel	Rubínová tryska
Maximální teplota extruderu	320 °C	280 °C
Maximální teplota podložky	120 °C	100 °C
Velikost vrstvy	0,1 - 0,4 mm	0,1 - 0,5 mm
Přesnost v ose x,y	0,05 mm	0,02 mm
Přesnost v ose z	0,02 mm	0,0025 mm
Rychlost tisku	80 mm/s	120 mm/s

### 7.3 NASTAVENÍ PARAMETRŮ TISKÁREN

Nastavení tiskárny a příprava parametrů pro tisk je velice důležitá operace, která se často opomíná a tiskne se jen se základními nastaveními. Ke každému materiálu byla vytvořena zkušební tělesa pro optimální nastavení všech důležitých parametrů. Nejprve byla tisknuta teplotní věž, která je na obrázku č. 19. Na této věži bylo určeno, jaké teploty se musí nastavit pro ideální vlastnosti výtisku. Dále bylo vytisknuto několik testovacích kostek, u kterých bylo zjišťováno, jaká je ideální rychlost tisku, aby nedocházelo k nepřesnostem při tisku. Z těchto hodnot byly nastaveny parametry tisku. Tabulka nastavení pro tisk PLA zobrazena v tabulce 12 a další nastavení pro jiné materiály lze nalézt v příloze č.1 pro opakování tisku se stejnými parametry.

Tabulka 12 Ukázka nastavení parametrů tisku

Parametry tisku	Nastavené hodnoty
Teplota extruderu	215 °C
Teplota podložky	65 °C
Chlazení tisku	100 %
Chlazení od vrstvy	Čtvrtá vrstva
Rychlost tisku	70 mm/s
Výška vrstvy	0,2 mm
Šířka vrstvy	0.8 mm
Počet perimetrů	12
Začátek tisku vrstvy	Pravý roh vnější
Plnění	100 %
Retrakce	Jen při změně vrstvy
Komora	NE



*Obr. 19 Ukázka teplotní věže*

## 7.4 ŽÍHÁNÍ

Žíhání plastů je metoda, která byla převzata z metalurgie za účelem vylepšování některých vlastností plastů. Jedná se o metodu tepelného zpracování už hotových výrobků v rámci konečných úprav, kde dochází vlivem řízeného ohřívání ke změně stavu struktury a tím ke změně vlastností.

První zmínky o žíhání termoplastů pochází z Německa, kde fyzik H. A. Stuart popsal postupy žíhání v knize *Die Physik Der Hochpolymeren*. V tomto poválečném období získalo žíhání plastů nemalé oblibě a používá se dodnes. V 80. a 90. letech probíhal výzkum i v České republice, a to na fakultě materiálů ČVUT v Praze. V těchto studiích se zkoumalo, jak žíhání ovlivňuje šíření trhlin v materiálech. [28]

### 7.4.1 VYSOUŠECÍ KOMORA PRO ŽÍHÁNÍ

Žíhání plastu probíhalo ve vysoušecí komoře, která plně vystačila pro potřeby žíhání. Byla vybrána komora Venticell ECO line, která byla schopna žíhat plasty až do teploty 250 °C. Komora má časovač, na kterém bylo vždy nastaveno 30 minut. Zkušební tělesa byla vždy vkládána do vyhřáté komory a po vložení těles byla na komoře nastavena prodleva jedné minuty na stabilizování nastavené teploty. Stabilizace teploty byla nutná pro přesnější měření, protože při otevření dveří komory došlo k ochlazení prostoru uvnitř komory. Vysoušecí komoru lze vidět na obr. č. 20.





*Obr. 20 Ukázka vysoušecí komory pro žíhání*

#### **7.4.2 POSTUP ŽÍHÁNÍ TERMOPLASTŮ**

Postup žíhání plastů je stejný jako u kovových materiálů, jen se plasty zahřívají na daleko menší teploty. Postup je rozdělen na tři části. První je část zahřívací na předepsanou teplotu  $T_a$ . Druhá část je setrvání na předepsané teplotě a poslední část je pozvolné ochlazování. Každý plast je specifický, a proto potřebuje specifické nastavení teploty a času setrvání na této teplotě. Termoplasty se dají rozdělit na dvě skupiny, a to na amorfní a krystalizující. Termoplasty s amorfní strukturou se žíhají na teplotu blízkou jejich skelnému přechodu, protože po překročení skelného přechodu dochází k silné deformaci. Pro krystalické termoplasty platí, že se ohřev provádí až k hranici teploty tání  $T_g$ . Tyto teploty platí jen pro jednoduchá tělesa, protože čím má prvek více detailů a tenkých stěn, tím dochází k dřívějšímu prohřátí materiálů a možné deformaci. Vlastnosti žíhaných prvků jsou závislé na rozdílu teplot  $T_g - T_a$  pro amorfní látky a pro krystalizující látky platí rozdíl teplot  $T_m - T_a$ . Pro žíhání 3D dílů z termoplastů se používají hlavně horkovzdušné pece nebo v lepším případě vyhřívané komory v inertní atmosféře. [28]



### 7.4.3 STRUKTURNÍ PŘEMĚNY V TERMOPLASTECH

Použití žíhání v oblasti 3D tisku je velice užitečné, protože žíháním je dosaženo snížení vnitřního pnutí materiálu a tím se dá zamezit vzniku křezů. Těleso vznikající pomocí 3D tisku, jak bylo řečeno, vzniká nanášením tenkých vrstev roztaveného materiálu. Tento materiál je ale pokládán na již zchladlou vrstvu materiálu, a dochází vlivem rozdílných teplot k roztažnosti a smrškování vrstev. Touto roztažností dochází k vnitřnímu pnutí v materiálu.

Největší problém je u amorfních termoplastů, u kterých vznikají křezy nejčastěji. Do amorfních termoplastů se řadí např. polykarbonát, polysulfon nebo polyetherimid. Do druhé skupiny tedy spadají termoplasty, které krystalizují a lze tedy tvrdit, že žíháním mohou vzniknout dva procesy. První je proces žíhání s překrystalizací u kterého se metastabilní krystalické struktury mění na stabilnější. Takové procesy probíhají například u polypropylenů nebo u polyamidů. U žíhání bez překrystalizace dochází k zvětšování a zdokonalování krystalických oblastí, tudíž ubývá amorfní fáze a přibývá krystalické. [28]

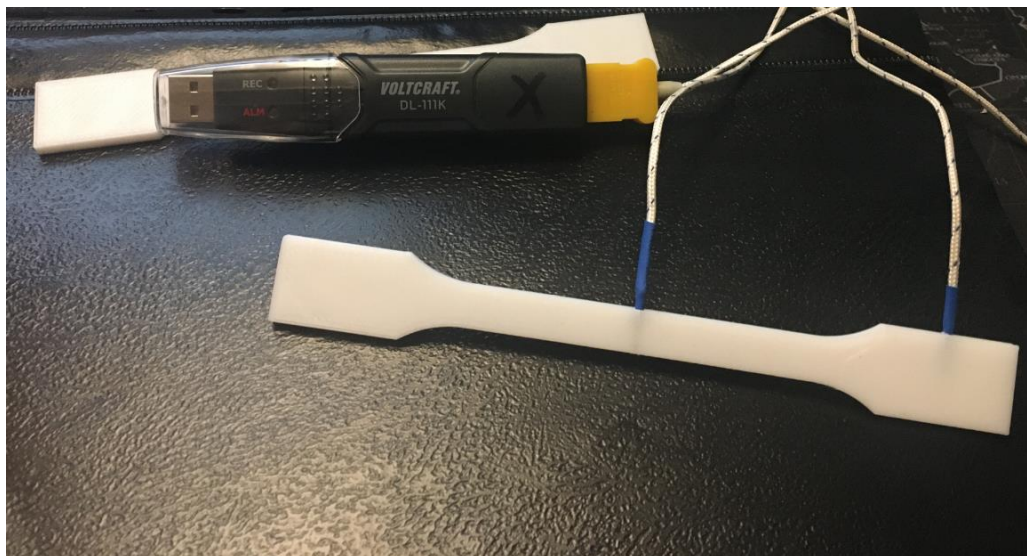
### 7.4.4 VLIV ŽÍHÁNÍ NA VLASTNOSTI TERMOPLASTŮ

Žíhání má hlavní vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti materiálů, a to jak pozitivně, tak i negativně. Pro krystalizující termoplasty platí, že žíháním se zvyšuje jejich pevnost a modul pružnosti. Mezi vlastnosti, které se procesem zhorší patří poměrné prodloužení a rázová houževnatost. Dále má žíhání vliv i na tribologické vlastnosti, zvyšuje teplotu tání, zlepšuje se chemická odolnost, zmenšuje se navlhavost a nasákavost, snižuje se koroze polymerů. [28]

## 7.5 ŽÍHÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

### 7.5.1 STANOVENÍ TEPLoty A ČASU ŽÍHÁNÍ

Pro žíhání bylo vyhotoveno celkem 288 zkušebních těles ve tvaru dog bone 1A a 48 ve tvaru desek o rozměrech 50 x 50 x 6 mm. Byly voleny různé materiály, a to jak amorfní, tak i krystalizující, aby byla popsána co největší oblast materiálů. Na všech materiálech bylo provedeno žíhání, alespoň při třech teplotách. Nejprve bylo potřeba zjistit teplotu skelného přechodu a teplotu tání všech zkoušených materiálů. Tato hodnota byla zjištěna experimentálně za pomoci teplotního dataloggeru Voltcraft DL-111K. Datalogger má teplotní čidlo typu K, které je schopno měřit teplotní rozsah od -200 do 1370 °C. Tento článek má průměr 2,5 mm, a proto byly do měřeného objektu vyvrtány díry o průměru 2,5 mm, do kterých byl článek vložen. Poté byl testovaný vzorek i s článkem vložen do pece a byl vyhříván na 80 °C. Poněvadž článek byl uvnitř zkoušeného předmětu, dala se odhadnout doba, za kterou se ohřeje prvek na konstantní teplotu po celém objemu. Z měření bylo usouzeno, že ideální doba umístění vzorku v peci je půl hodiny. Většina vzorků byla schopna se dostat na hodnotu 80 °C zhruba v rozmezí 18 až 22 minut. Vzor zkušebního tělesa s čidly lze vidět na obr.č. 21.



*Obr. 21 Vzor zkušebního tělesa pro prostupu tepla celým objemem tělesa*

Po přibližném zjištění této hodnoty byly stanoveny teploty žíhání, přičemž nejvyšší teplota byla nastavena právě blízko teploty skelného přechodu nebo teploty tání materiálu. Poněvadž všechny testované materiály mají různé teploty skelného přechodu a teploty tání, tak bylo rozhodnuto neporovnávat všechny materiály společně, ale vytvořit skupiny podobných materiálu, které mají stejné nebo podobné využití a porovnávat tyto materiály. Skupiny byly rozděleny na biologické a konstrukční materiály, kde v biologické skupině jsou různé modifikace PLA a v konstrukčních dílech jsou materiály ABS, HIPS, PET-G, ASA.

### **7.5.2 ŽÍHÁNÍ MATERIÁLU PLA**

Největší problém materiálu PLA je jeho deformace už při 60 °C, protože má nízkou teplotu skelného přechodu a díky vnitřnímu pnutí dochází k deformaci. Žíháním dochází k odstranění vnitřního pnutí a tím k dosažení lepší teplotní stability prvku. U těchto materiálů musí docházet k postupnému zahřívání na určitou teplotu a poté se na této teplotě musí setrvat přibližně 30 minut. Pro studii byly vybrány 4 vzorky PLA materiálů a ty byly žíhány při třech různých teplotách. Zvolení teplot probíhalo, dle zjištěných dat o skelném přechodu různých PLA. Nejnižší teplotu skelného přechodu mělo PLA značky Creality, u kterého se pohybuje hodnota kolem 70°C. Hodnota 70 °C byla stanovena z měření tří sad vzorků, které byly přeměřovány. Po změně rozměrů o 5 % v součtu všech směrů byla stanovena hodnota skelného přechodu. Měření této hodnoty je v tabulce 13. Výpočty jsou vypsány pod tabulkou pod čísly 6 až 15.

Tabulka 13 Naměřených a vypočtených hodnot pro materiál PLA Creality

PLA Creality white dog bone			
Teplota [°C]	Změna tvaru tělesa v ose		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
0	169,6	19,92	3,81
	169,7	19,91	3,78
	169,6	19,88	3,76
50	169,6	19,92	3,81
	169,7	19,91	3,78
	169,6	19,88	3,76
60	169,6	19,89	3,72
	169,5	19,85	3,73
	169,4	19,84	3,71
70	165,2	19,86	3,86
	165,3	19,79	3,89
	165,4	19,78	3,88
Teplota [°C]	Průměrná změna tvaru [mm]		
	X	Y	Z
0	169,63	19,90	3,78
50	169,63	19,90	3,78
60	169,5	19,86	3,72
70	165,3	19,81	3,88
Teplota [°C]	Průměrná změna tvaru [mm]		
	X [%]	Y [%]	Z [%]
0	100	100	100
50	100	100	100
60	99,92	99,78	98,33
70	97,45	99,53	102,47

Příklady výpočtů pro tabulku 13.

$$x_{\text{průměr}} = \frac{165,2 + 165,3 + 165,4}{3} = 165,3 \text{ mm} \quad (6)$$

$$y_{\text{průměr}} = \frac{19,86 + 19,79 + 19,78}{3} = 19,81 \text{ mm} \quad (7)$$

$$z_{\text{průměr}} = \frac{3,86 + 3,89 + 3,88}{3} = 3,88 \text{ mm} \quad (8)$$

$$x_{\text{průměr}\%} = \frac{100 \cdot 165,3}{169,63} = 97,45 \% \quad (9)$$

$$y_{\text{průměr}\%} = \frac{100 \cdot 19,81}{19,9} = 99,53 \% \quad (10)$$

$$z_{\text{průměr}\%} = \frac{100 \cdot 3,88}{3,78} = 102,47 \% \quad (11)$$

$$x_{změna\%} = 100 - 97,45 = 2,55 \% \quad (12)$$

$$y_{změna\%} = 100 - 99,53 = 0,47 \% \quad (13)$$

$$z_{změna\%} = 102,47 - 100 = 2,47 \% \quad (14)$$

$$celková\ změna = 2,55 + 0,47 + 2,47 = 5,49 \% \quad (15)$$

Od hranice 70 °C bylo prováděno žihání pro další tři teploty, a to pro 80 °C, 110 °C a 130 °C. Tyto hodnoty byly stanoveny dle dalších experimentů a měření, které probíhaly obdobně jako stanovení počáteční teploty.

## 7.6 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ ŽIHÁNÍ

Po vytištění všech testovacích těles byla tělesa umístěna na skleněnou podložku, která byla vložena do vysoušecí pece.

Na vysoušecí peci bylo možné nastavit teplotu až 250 °C, což bylo pro žihání zkušebních těles dostačující. Žihána byla vždy jedna celá série, která čítala 9 zkušebních těles čtyřech různých materiálů.

Po vyžihání byly prvky vyndány z pece a chlazeny při pokojové teplotě 21,5 °C. Následně byly vzorky přeměřeny ve všech osách a naměřené hodnoty vyhodnoceny.

### 7.6.1 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ ŽIHÁNÍ PRO PLA

K měření byly vybrány čtyři cenové kategorie materiálů PLA tak, aby byl zvolen vždy materiál určité kvality a kategorie. Materiály seřazené dle ceny lze vidět v tabulce 14. Jako nejlevnější materiály, pro srovnání, byly zvoleny materiály od firmy Creality, a to obyčejné PLA White a PLA+, též někdy označované jako PLA-ST. Materiály jsou si velice podobné, a tudíž není potřeba měnit parametry tisku, ale po vytištění má materiál PLA-ST trochu lepší kvalitu povrchu a je schopno daleko lépe držet odstín barvy.

Z klasického PLA vzniklo PLA-ST, do kterého byly přidány modifikátory a přísady, které ale nejsou od výrobce poskytovány. Jako zástupce nejkvalitnějšího filamentu byl zvolen Prusament, který vyniká skvělým návinem a skvělými vlastnostmi filamentu. Nejdražším zástupcem je PLA HTPRO, který vyniká svými vlastnostmi, hlavně v oblasti tepelného namáhání. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 15, 16, 17 a 18.

*Tabulka 14 Ceny použitých materiálů*

Materiál	Cena
PLA Creality White	350 Kč
PLA Creality ST/PLUS Grey	450 Kč
PLA Prusament Galaxy Black	599 Kč
PLA HTPRO Plastika Trček	692 Kč

Tabulka 15 Změna rozměrů materiálu PLA HTPRO a PLA Prusa GB

PLA HTPRO Plastika Trček				PLA Galaxy Black Prusa			
Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]			Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]		
	osa X	osa Y	osa Z		osa X	osa Y	osa Z
0	170,3	19,93	3,71	0	170,1	19,99	3,82
	170,5	19,93	3,68		170,3	19,98	3,83
	170,2	19,94	3,66		170,2	19,98	3,82
80	169,2	19,91	3,71	80	166,3	19,8	3,81
	169,4	19,92	3,72		167,1	19,89	3,84
	169,5	19,92	3,73		167,2	19,81	3,83
110	168,9	19,84	3,79	110	160,1	20,32	4,23
	168,8	19,85	3,78		159,9	20,41	4,11
	168,9	19,9	3,79		159,8	20,42	4,21
130	167,7	19,82	3,81	130	155,2	21,12	4,35
	167,2	19,82	3,82		151,3	21,38	4,28
	167,6	19,77	3,82		156,2	21,22	4,31

Tabulka 16 Procentuální změna rozměrů materiálů PLA HTPRO a PLA Prusa GB

PLA HTPRO Plastika Trček				PLA Galaxy Black Prusa			
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	170,33	19,93	3,68	0	170,20	19,98	3,82
80	169,37	19,92	3,72	80	166,87	19,83	3,83
110	168,87	19,86	3,79	110	159,93	20,38	4,18
130	167,50	19,80	3,82	130	154,23	21,24	4,31
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	100,00	100,00	100,00	0	100,00	100,00	100,00
80	99,43	99,92	101,00	80	98,04	99,25	100,09
110	99,14	99,65	102,81	110	93,97	102,00	109,42
130	98,34	99,35	103,62	130	90,62	106,29	112,82

Tabulka 17 Změna rozměrů materiálu PLA Creality white a PLA-ST Creality

PLA white Creality				PLA-ST Grey Creality			
Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]			Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	169,8	19,92	3,81	0	170,4	19,98	3,65
	169,7	19,91	3,78		170,5	19,93	3,66
	169,8	19,88	3,76		170,4	19,92	3,68
80	165,2	19,86	3,86	80	168,1	19,76	3,75
	165,3	19,79	3,89		168,2	19,81	3,76
	165,4	19,78	3,88		168,9	19,74	3,73
110	156,3	19,76	4,21	110	167,2	19,74	3,83
	155,9	19,71	4,11		166,1	19,73	3,82
	156,4	19,75	4,12		166,9	19,72	3,81
130	152,2	22,47	3,56	130	162,2	21,82	3,55
	152,6	22,21	3,49		162,6	22,19	3,52
	153,2	22,92	3,49		163,2	21,92	3,53

Naměřené hodnoty byly dále zpracovány a byla určena procentuální změna v různých osách. Tyto hodnoty byly zaneseny do tabulky 16 a 18.

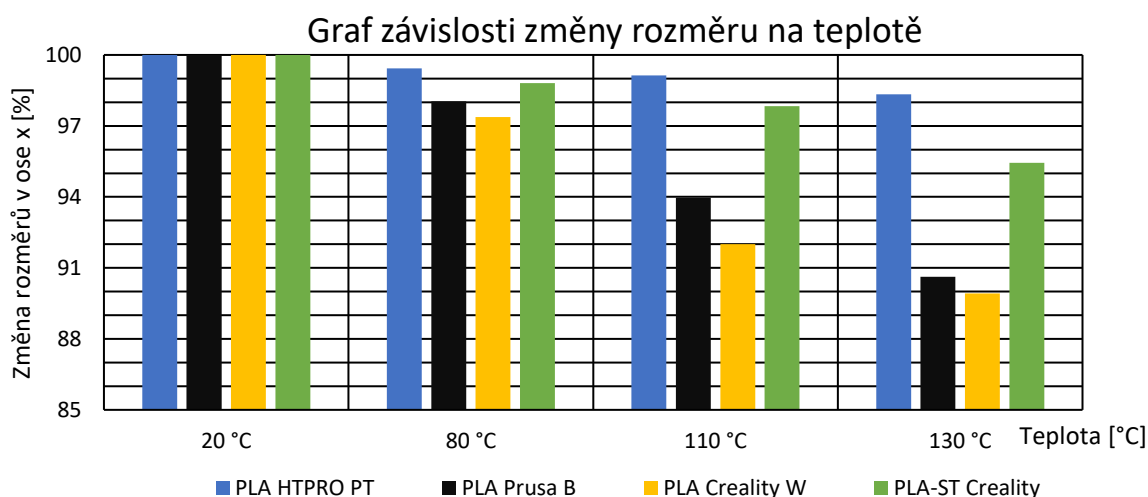
Tabulka 18 Procentuální změna rozměrů materiálů PLA Creality white a PLA-ST Creality

PLA white Creality				PLA-ST Grey Creality			
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	169,77	19,90	3,78	0	170,43	19,94	3,66
80	165,30	19,81	3,88	80	168,40	19,77	3,75
110	156,20	19,74	4,15	110	166,73	19,73	3,82
130	152,67	22,53	3,51	130	162,67	21,98	3,53
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	100,00	100,00	100,00	0	100,00	100,00	100,00
80	97,37	99,53	102,47	80	98,81	99,13	102,27
110	92,01	99,18	109,60	110	97,83	98,93	104,28
130	89,93	113,21	92,86	130	95,44	110,20	96,45

Hodnoty z tabulek 15, 16, 17 a 18 byly použity pro odhadnutí smrštění při různém působení teplot. Z tabulek lze zjistit přibližná teplota skelného přechodu a dá se určit, kdy si ještě těleso zachová tvar a splňuje tolerance dle normy ISO 2768-1. Při zjištění skelného přechodu se dá zvolit teplota, při které těleso neztrácí znatelně svůj tvar, ale je mu do značné míry sníženo vnitřní pnutí. Tudíž lze posléze dosáhnout lepších mechanických vlastností, bez využití dražších materiálů. Z výsledků se dají upravit procentuální velikosti tištěných dílů a dá se navrhnout těleso, kterému budou změněny

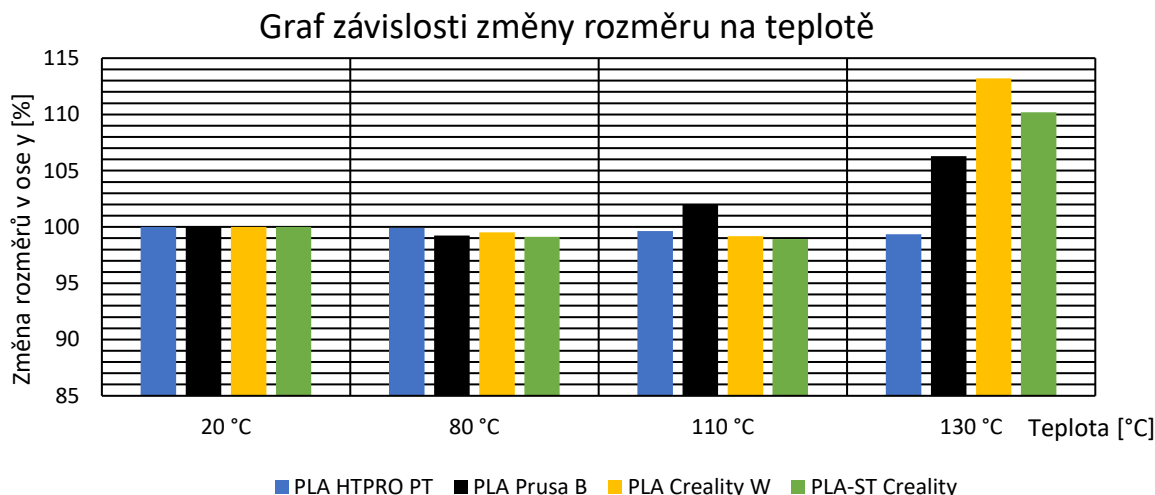
rozměry o hodnoty smrštění nebo roztažení, aby po žíhání mělo požadované rozměry. Hodnoty pro porovnání materiálů byly vyneseny do grafů č. 3, 4 a 5. Poněvadž materiál PLA mění své rozměry už nad teplotou 60 °C a větší změny lze pozorovat při 80 °C. V prvním grafu závislosti změny rozměrů na teplotě v ose x, která tvoří nejdelší část zkušebního tělesa, lze pozorovat smršťování při všech teplotách. Těleso je tištěno jen z perimetrů (stěn bez výplně), a tudíž, než tryska nanese další vrstvu materiálu, je předešlá vrstva již zchlazena na teplotu okolí a dochází k rozdílu teplot, které zapříčiní kvůli teplotní roztažnosti, vnitřní pnutí. Díky vnitřnímu pnutí má zkušební těleso tendenci se v této ose nejvíce smršťovat. Z naměřených hodnot lze vyčíst že, skoro všechna zkušební tělesa zvládla teplotu 80 °C, až na materiál Creality White, který přesáhl hodnotu změny tvaru o 2,5 mm, což dle normy ISO 2768-1 nesplňuje řazení do Třídy přesnosti v (velmi hrubá). [29]

Při teplotě 110 °C a 130 °C se zdeformovala i ostatní zkušební tělesa nad hranici 2,5 mm, a tudíž přestala splňovat normu. U materiálů PLA Prusa B a PLA-ST Creality, při teplotě 110 °C nedocházelo k úplné deformaci, tudíž by se změnou rozměrů ve sliceru, daly upravit hodnoty procentního zvětšení a tím vytisknout předmět, který by i po vyžehání byl přesných rozměrů splňující normu. Teplotě 130 °C odolal jen materiál PLA HTPRO od firmy Plastika Trček, který splňoval normu i při této teplotě. [29]



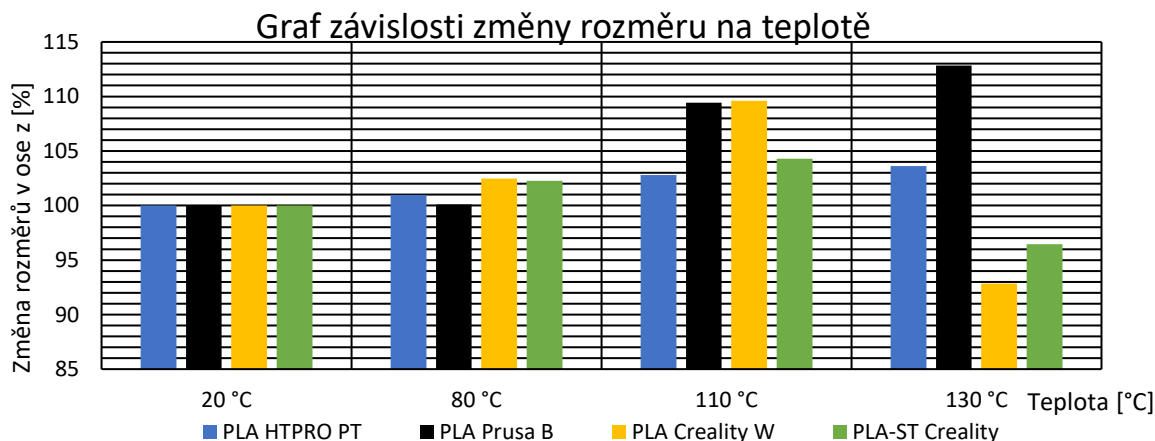
*Graf 3 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose x*

V grafu č. 4 lze sledovat změny už při 80 °C, ale u této teploty ještě nedochází k deformaci, která by překročila normu. Je to způsobeno tím, že ve směru y měl zkušební předmět jen 20 mm, a proto nedocházelo k tak velkému teplotnímu rozdílu mezi vrstvami a není viditelné žádné větší vnitřní pnutí. Materiál má tendenci se se zvyšující teplotou dále smršťovat, než nastane teplota tání. Při dosažení bodu tání se materiál nekontrolovatelně bortí, hlavně v ose y.



*Graf 4 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose y*

U grafu č. 5. je vyhodnocena změna tvaru v ose z. Charakter změny je přesně opačný než u osy y, protože v ose z nevzniká skoro žádné vnitřní pnutí. Díky absenci vnitřního pnutí má materiál tendenci rozpínat se v ose z, protože v této ose neklade síle pnutí odpor žádná síla, kromě gravitační. Z tohoto grafu je patrné, že při překročení skelného přechodu se přestane materiál rozpínat v ose z a začne se roztékat do stran vlivem gravitace. Jediný materiál, který vydržel teplotu 130 °C byl materiál od firmy Plastika Trček. PLA HTPRO je schopno vydržet tak vysoké teploty, protože jsou do něj vkládány heterogenní nukleační zárodky, které značně ovlivňují vlastnosti daného materiálu.



*Graf 5 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose z*

Dávat nukleační činidla do levných materiálů se stává čím dál větším trendem, protože lze zachovat dobré vlastnosti tisku, a přitom mít vlastnosti daleko dražších materiálů, jako je teplotní odolnost. Činidla dávají polymerům vyšší teplotu krystalizace a díky tomu se tvoří více malých sférolitů, které napomáhají tribologickým nebo mechanickým vlastnostem. Po přidání nukleačních činidel polymer změní své vlastnosti a stane se netěkavý a inertní k prostředí. Po přidání nukleačního činidla, taktéž vzroste bod tání. Při dodání nukleačního činidla se musí dbát na dobré rozptýlení, protože může docházet k nerovnoměrné krystalizaci, která zapříčiní snížení mechanických vlastností a může mít za následek vznik křejzrů.



## 7.6.2 VYHODNOCENÍ A ZHODNOCENÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

Druhá skupina materiálů je nazvaná jako konstrukční materiály, protože se hojněji používají v průmyslu na levné konstrukční díly, které nejsou moc namáhané. Obvyklé využití těchto materiálů je na funkční prototypy obvykle jen na výstavu. Materiály použité v této části jsou v tabulce č.19, kde jsou materiály seřazeny dle ceny.

Tabulka 19 Zobrazení cen materiálů

Materiál	Cena
ABS Gembird White	363 Kč
PET-G Devil Design Black	480 Kč
HIPS Plastika Trček	560 Kč
ASA Plastika Trček	692 Kč

Byly vybrány materiály, které se používají více jako ABS a PET-G a dále méně známe materiály jako je ASA a HIPS. Materiál ASA i materiál HIPS byly vytvářeny jako náhrada materiálu ABS. Bohužel ASA se svou cenovkou, která je dvakrát vyšší než u běžného ABS, nikdy úplně ABS nenahradila. HIPS také nikdy nenahradil ABS, ale hojně se využívá pro podpory u ABS, protože je rozpustný v lemonsolu. Jediný materiál, který po svém vzniku začal vytlačovat ABS je PET-G, který má malou teplotní roztažnost a parametry by se měl přibližovat právě ABS.

Jako v první skupině, byly materiály vkládány do vysoušecí pece a posléze byly přeměřeny a hodnoty byly zaneseny do tabulky č. 20, 21, 22 a č. 23. V tabulce jsou zapsány rozměry vždy jednoho materiálu pro různých teplotách. V další tabulce byly rozměry zprůměrovány a byla vypočtena procentuální změna rozměrů. Průměrná hodnota byla důležitá pro kontrolu, kdy ještě zkušební těleso vyhovovalo normě ISO 2768-1. [29]

Tabulka 20 Změna rozměrů materiálu HIPS a ABS

HIPS Plastika Trček				ABS white Gembird			
Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]			Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	169,80	20,04	3,91	0	169,70	19,84	3,85
	170,00	20,12	3,83		169,80	19,83	3,78
	170,00	20,11	3,82		169,70	19,86	3,83
70	169,70	19,82	3,95	70	169,30	19,81	3,85
	169,80	19,95	3,95		169,40	19,82	3,86
	169,90	20,11	3,96		169,50	19,79	3,88
80	169,20	19,92	3,93	80	169,10	19,75	3,90
	169,30	19,95	3,96		169,20	19,78	3,91
	169,50	19,90	3,99		169,30	19,74	3,92
90	166,50	19,95	3,99	90	169,20	19,72	3,95
	167,80	19,79	4,02		169,10	19,73	3,97
	168,10	19,95	4,08		169,10	19,72	3,94
100	138,67	20,52	4,52	100	164,20	19,40	4,12
	139,00	20,63	4,65		163,50	19,52	4,11
	138,94	20,74	4,44		164,50	19,49	4,15

Z tabulek 21 a 23 lze zjistit, kdy ještě materiály jsou schopny splňovat normu ISO 2768-1 a kdy se dostanou na hranici skelného přechodu. Z tabulky lze odečíst, že všechny materiály, až na PET-G, splňují normu až do 90 °C. Pro lepší přehlednost byly procentuální rozdíly zaneseny do grafů 6, 7 a 8.

*Tabulka 21 Procentuální změna rozměrů materiálu HIPS a ABS*

HIPS Plastika Trček				ABS white Gembird			
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	169,93	20,09	3,85	0	0,00	169,73	19,84
70	169,80	19,96	3,95	70	70,00	169,40	19,81
80	169,33	19,92	3,96	80	80,00	169,20	19,76
90	167,47	19,90	4,03	90	90,00	169,13	19,72
100	138,87	20,63	4,54	100	100,00	164,07	19,47
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	100,00	100,00	100,00	0	100,00	100,00	100,00
70	99,92	99,35	102,60	70	99,80	99,82	101,13
80	99,65	99,17	102,77	80	99,69	99,56	102,36
90	98,55	99,04	104,58	90	99,65	99,40	103,49
100	81,72	102,69	117,73	100	96,66	98,12	108,03

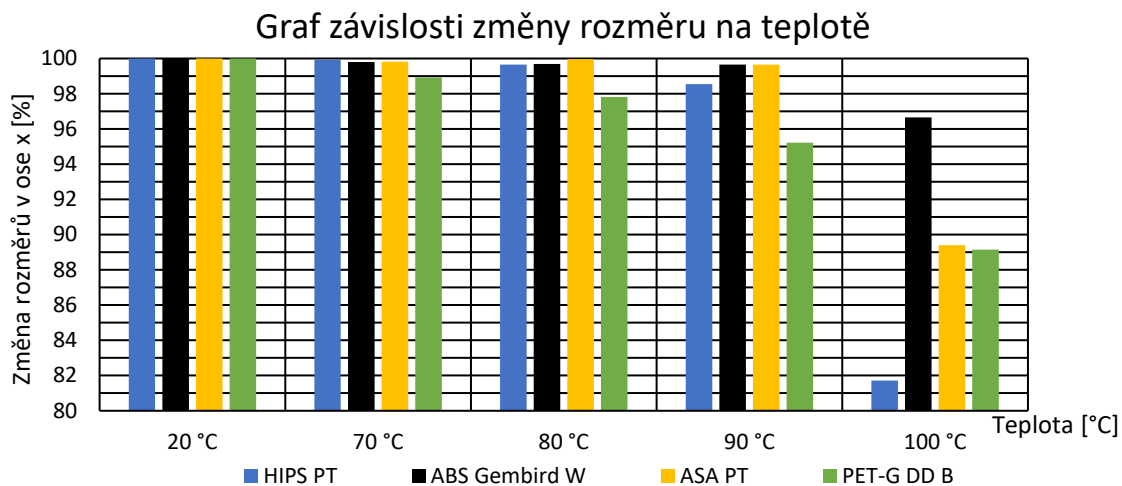
*Tabulka 22 Změny rozměrů materiálu ASA a PET-G*

ASA Plastika Trček				PET-G Devil Design black			
Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]			Teploty [°C]	Změna rozměru v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	169,20	19,98	3,82	0	170,00	19,95	3,58
	170,20	20,01	3,81		170,20	19,91	3,55
	170,10	19,97	3,84		170,00	19,92	3,62
70	169,20	19,96	3,88	70	168,20	19,88	3,63
	169,60	19,93	3,82		168,30	19,82	3,65
	169,80	19,92	3,89		168,20	19,81	3,68
80	169,80	19,85	3,95	80	166,20	19,72	3,75
	169,90	19,81	4,01		166,00	19,68	3,78
	169,60	19,82	3,99		166,90	19,78	3,82
90	169,60	19,62	4,02	90	161,80	19,85	4,10
	168,90	19,71	4,11		161,20	19,87	4,12
	169,20	19,67	4,09		162,80	19,82	4,09
100	151,33	19,95	3,98	100	151,50	20,16	4,08
	152,38	20,12	3,99		151,20	20,60	4,07
	151,82	19,92	3,93		152,10	20,65	4,09

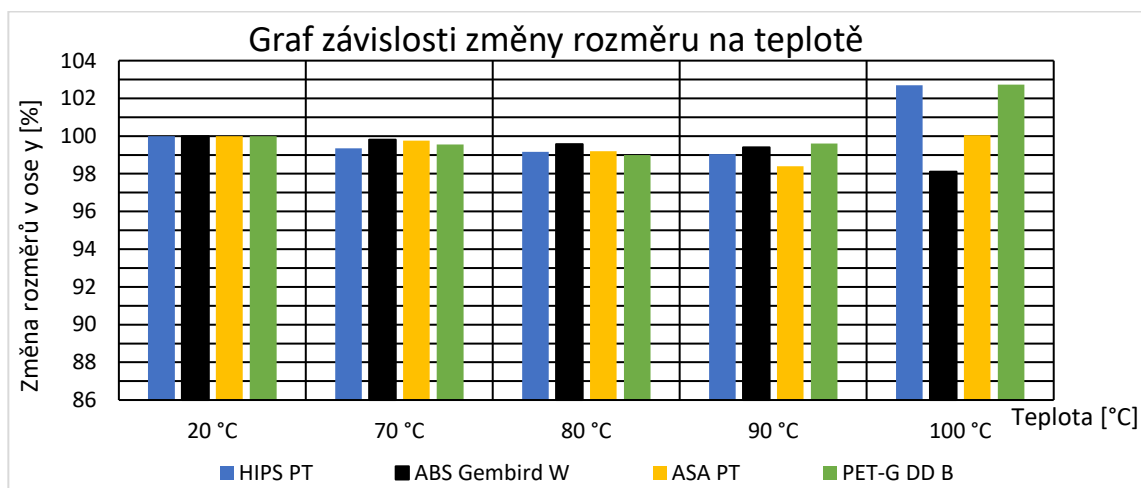
Tabulka 23 Procentuální změny rozměrů materiálu ASA a PET-G

ASA Plastika Trček				PET-G Devil Design black			
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [mm]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	169,83	19,99	3,82	0	170,07	19,93	3,58
70	169,53	19,94	3,86	70	168,23	19,84	3,65
80	169,77	19,83	3,98	80	166,37	19,73	3,78
90	169,23	19,67	4,07	90	161,93	19,85	4,10
100	151,84	20,00	3,97	100	151,60	20,47	4,08
Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]			Teploty [°C]	Průměr změny v ose [%]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z		Osa X	Osa Y	Osa Z
0	100,00	100,00	100,00	0	100,00	100,00	100,00
70	99,82	99,75	101,05	70	98,92	99,55	101,95
80	99,96	99,20	104,18	80	97,82	99,00	105,58
90	99,65	98,40	106,54	90	95,22	99,60	114,51
100	89,41	100,05	103,75	100	89,14	102,73	113,86

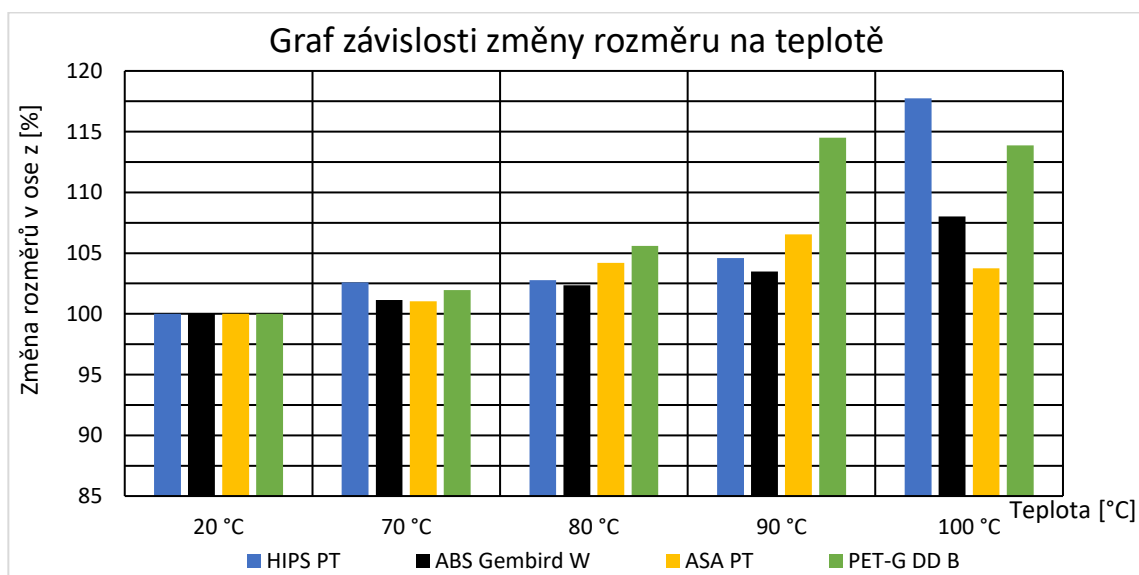
V grafu č. 6 lze pozorovat, jak tělesa mění tvar v ose x. Zkušební tělesa jako HIPS, ABS a ASA si zachovávají tvar až do 90 °C, což odpovídá teorii o těchto materiálech. Narozdíl od materiálu PLA nejsou schopny tyto konstrukční díly setrvat delší dobu na hranici skelného přechodu a dochází k úplné deformaci tělesa, což lze vidět hlavně u materiálu HIPS, ASA a PET-G. Tyto materiály dokázaly na nastavené teplotě v okolí skelného přechodu setrvat zhruba 5 až 8 minut, a poté se úplně zdeformovaly. Deformace v ose x byla způsobena vnitřním pnutím materiálu, který se měl tendenci v tomto směru smršťovat, aby snížil pnutí. Na grafu sedm, který zobrazuje změnu tvaru zkušební tělesa v ose y, lze vidět, že zkušební tělesa velice dobře drží svůj tvar a mají tendenci se smršťovat, kvůli vnitřnímu pnutí. Poté lze vidět hlavně u teploty 100 °C, že po překročení bodu skelného přechodu se tělesa začnou vlivem gravitace rozpínat. Na grafu 8 lze vidět deformaci zkušební tělesa HIPS už při 70 °C. Hodnota dosažená v procentní změně rozměrů činila 102,59 %. Materiál HIPS sice začal měnit své rozměry jako první materiál, ale po změně nad 3 % už své rozměry neměnil, až do hranice skelného přechodu. Z grafů je patrné, že rozdíl mezi PLA a konstrukčními materiály je hlavně ve stálosti do teploty skelného přechodu. PLA při překročení teploty skelného přechodu se celé deformuje a začne se rozpínat hlavně v ose y. U konstrukčních zkušebních těles nastal opačný jev. Při zvyšování teploty měly zkušební tělesa tendenci se nadále smršťovat v ose x, ale v ostatních osách se rozpínaly, a to hlavně v ose z.



*Graf 6 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose x*



*Graf 7 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose y*



*Graf 8 Porovnání změny rozměrů materiálů v ose z*

## 8. KLIMATICKÉ ZKOUŠKY

Tato kapitola se zabývá simulací působení běžných klimatických podmínek na materiály pro 3D tisk. Cílem této kapitoly bylo poukázat na degradaci prvků, které byly zhotoveny 3D tiskem, za pomoci UV záření, zvýšené vlhkosti a zvýšené teploty.

### 8.1 KLIMATICKÁ KOMORA

Jedná se o zařízení, které slouží k simulaci běžného prostředí, ve kterém se obvykle zkoušený předmět nachází. Své využití najde ve všech odvětvích průmyslu, a to zejména ve strojírenství, elektrotechnice ale například i v oděvnictví nebo potravinářství.

Klimatická komora funguje na principu nastavených cyklů, které se po určitém čase mění. V těchto cyklech lze nastavit jakékoliv podmínky, které panují v různých prostředích, kde mají zařízení fungovat. Klimatické komory se prodávají v různých provedeních. Mezi nejpoužívanější provedení patří stolní a samostatně stojící komory, které mají vnitřní prostor velký obvykle od nižších desítek centimetrů až do jednoho metru. Dále se také dělají komory, které mají prostor velký několik metrů a umožňují vstoupit pracovníkovi dovnitř. Tyto komory se využívají například na měření fotovoltaických panelů nebo různých větších zařízení. Největší klimatické komory jsou klimatizační místnosti, kde není problém měřit i celý automobil.

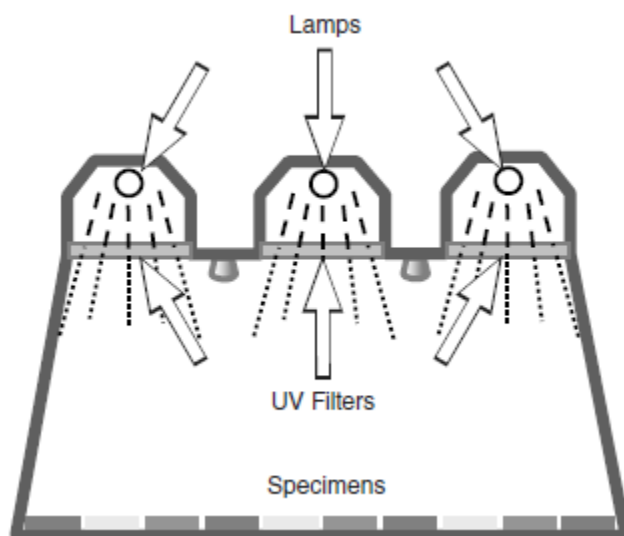
#### 8.1.1 KLIMATICKÁ KOMORA Q-SUN-XE3

Pro zkoušky byla použita xenonová komora od společnosti Q-LAB, která nese označení Q-SUN-Xe3. Komora byla zvolena, protože splňuje standardy pro testy plastů pro venkovní použití ASTM D2565 a pro testy plastů do vnitřních prostor ASTM D4459.

Komora má několik funkcí pro imitaci slunečního záření pro venkovní prostory, ale i pro prostory vnitřní. Funkce se mění výměnou patřičných filtrů, které jsou popsány v tabulce 24. Filtry jsou umístěny přímo pod lampou, která je zobrazena na Obr. 22. [30]

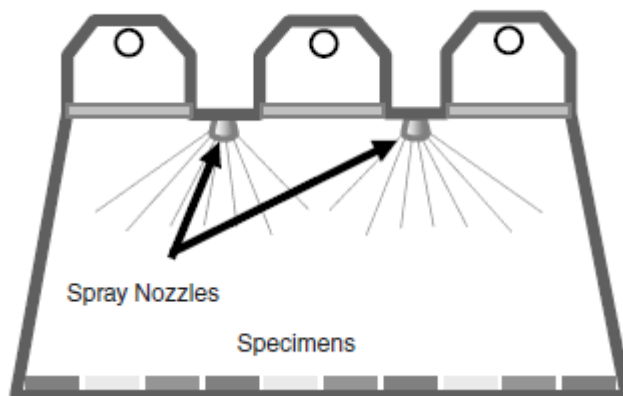
*Tabulka 24 Popis filtrů pro klimatickou komoru [30]*

Typ Filtru	Funkce
DAYLIGHT - Q	Polední letní světlo
DAYLIGHT - F	Polední letní světlo (metoda Ford)
DAYLIGHT - B/B	Krátkovlnné UV záření
WINDOW - Q	Polední letní světlo skrz čiré sklo
WINDOW - B/SL	Filtr pro specifikaci AATCC
WINDOW - IR	Podobný jako Q s filtrem IR
WINDOW – SF5	Specifické spektrum (Ford BO 116-01)
EXTENDED UV - Q/B	Propustí více UV než letní světlo (SAE J2412)
EXTENDED UV – Quartz	UV světlo



Obr. 22 Zobrazení uspořádání lamp v klimatické komoře [30]

Komora umožňuje také nastavit v cyklu ostřik daných prvků, pro simulaci deště. Simulace probíhá za pomoci trysek, které jsou umístěny mezi lampami. Na ostřiku lze regulovat tlak tryskající vody, průtok vody a čas ostřiku. Trysky lze vidět na obr. č.23.



Obr. 23 Zobrazení odstříkovačích hlav v klimatické komoře [30]

Komora je schopná také zvyšovat a snižovat relativní vlhkost. Relativní vlhkost, které lze dosáhnout závisí na teplotě černého panelu a teplotě vzduchu v komoře. Klimatická komora má několik čidel, které zajišťují její správný a bezpečný chod. Dále čidla ovládají sání vzduchu nebo klimatizační jednotku, aby byla zajištěna správná teplota v komoře. Čidla regulují teplotu, aby v komoře nevznikalo příliš velké teplo, které by mohlo způsobit poškození daných prvků při testu.

Hlavní teplotní čidla jsou tzv. černý panel a čidlo teploty vzduchu. Černý panel kontroluje teplotu, za pomoci termočlánku typu K, který je umístěn na černé destičce.

Černý panel je umístěn přímo na panelu, kde se ukládají prvky pro měření, aby byla přímo měřena teplota, která působí na měřené prvky. Čidlo teploty vzduchu měří teplotu vzduchu v komoře a ovládá sání studeného a teplého vzduchu, který proudí do komory. Sání vzduchu je regulováno pomocí dmýchadla s proměnnými otáčkami a elektrického ohřívače vzduchu.

Klimatická komora má na čelním panelu ovládací a zobrazovací displeje pro nastavení veškerých cyklů a celé klimatické komory. Tento panel je zobrazen a popsán na obr. 24 a celá klimatizační komora na obr.č.25.



Obr. 24 Zobrazení panelu klimatické komory s popisem [30]

Celá klimatická komora se nastavuje pomocí klávesnice, díky které lze volit programy. Programy jsou očíslovány 1 – 10 a slouží k zapnutí, nastavení a kalibraci komory. Programy jsou popsány v tabulce 25.

*Tabulka 25 Programu klimatické komory [30]*

Program	Funkce
P1	Nastavení / Reset doby trvání testu
P2	Výběr zkušební cyklus
P3	Úprava a vytváření cyklů
P4	Kalibruje teplotních senzorů
P5	Nastavení hlasitosti alarmu
P6	Nastavení ethernetové adresy
P8	Výběr jazyka
P9	Nastavení časovače lampy
P10	Nastavení postřiku



*Obr. 25 Klimatická komora Q-SUN Xe-3*



## 8.2 NASTAVENÍ CYKLŮ KLIMATICKÉ KOMORY

Pro nastavení bylo zapotřebí provést ověření přesnosti čidel komory, k čemuž byl využit datalogger Voltcraft DL111K na měření teploty a datalogger Voltcraft DL181HP na měření vlhkosti. Všechna naměřená data byla zpracovávána v programu Voltsoft Client. Měření teploty probíhalo hlavně na černých zkušebních tělesech, aby nedocházelo ke zvýšení teploty vlivem sálání. Během měření bylo zjištěno, že komora má odchylku od vlastní měřené soustavy zhruba 3 °C, což mohlo být způsobeno vlivem špatného umístění senzorů, kolem kterého mohl proudit vzduch. Měření vlhkosti dle dataloggeru bylo dostatečně přesné.

Po přeměření čidel následovalo zkušební měření, které bylo prováděno za účelem zjištění maximálních nastavení klimatické komory. Měření bylo zapotřebí udělat, protože u klimatické komory není naistalována klimatizační jednotka, která by byla schopna přístroj chladit při vyšších výkonech. Dále bylo zapotřebí zjistit jaká lze nastavit maximální relativní vlhkost, protože z klimatizační jednotky není proveden výdech ven z budovy, ale je vyveden jen do místnosti.

Z Měření bylo zjištěno, že maximální výkon, který je komora schopna držet dlouhodobě v několika cyklech je 100 W na každé lampě a relativní vlhkost byla stanovena na 50 %.

Po zjištění maximálních parametrů komory bylo možné stanovit cykly. Cykly nebylo možné nastavit dle žádné normy ani modelů kvůli omezení provozu, a tudíž byly stanoveny cykly vlastní dle provedené studie. Jako typ filtru byl zvolen DAYLIGHT – Q, protože se nejvíce přibližoval realitě, pro prvky pro firmu Bosch. Pro první cyklus byly nastaveny hodnoty lamp na 100 W a relativní vlhkost na 50 %. Druhý cyklus byl nastaven na 80 W výkonu lamp a relativní vlhkost byla 30 %. Třetí cyklus byl chladič cyklus díky, kterému klimatická komora měla čas vychladnout. Každý z cyklů byl nastaven na 1 hodinu a následně se přešlo na další. Každých 24 hodin byl spuštěn ostřík, který simuloval déšť. Ostřík byl spouštěn vždy po 24 hodinách, protože častější ostřík by způsobil přetečení nádoby na odpadní vodu. V Tabulce č. 26 lze vidět nastavení cyklů klimatické komory. [31]

*Tabulka 26 Nastavení cyklů klimatické komory*

Nastavení	Cyklus 1	Cyklus 2	Cyklus 3	Cyklus 4
Výkon lamp	100 W	80 W	0 W	0 W
Relativní vlhkost	50 %	40 %	30 %	50 %
Teplota černého panelu	65 °C	55 °C	-	-
Teplota vzduchu	60 °C	45 °C	25 °C	25 °C
Ostřík	NE	NE	NE	ANO
Doba Cyklu	1h	1h	1h	1h

### 8.3 MĚŘENÍ V KLIMATICKÉ KOMOŘE

Před měřením bylo nutné stanovit dobu setrvání vzorků v klimatické komoře a cykly. Doba byla stanovena na 15 dní přímého slunce s občasnými srážkami. Na jižní Moravě je za rok vyzářeno kolem  $1122 \text{ kW/m}^2$  energie. Bohužel z časového hlediska se k této hodnotě nedalo přiblížit, tudíž byla zvolena doba 15 slunečních dní v létě. V letních měsících bývá hodnota vyzářené energie za měsíc přibližně  $150,44 \text{ kWh/m}^2$ , a tudíž když bylo zapotřebí simulovat půl měsíce, tak energie vyzářená se musela přibližovat  $75,22 \text{ kWh/m}^2$ . Cykly byly nastaveny na 60 h celkového času, protože po 65 hodinách by došlo k přetečení nádoby na odpadní vodu. Za 60 h byla schopna komora vyzářit energii o velikosti  $34\,243 \text{ kJ/m}^2$  což se rovná  $9,512 \text{ kWh/m}^2$ . Aby bylo dosaženo simulace prostředí po dobu 15 dní bylo nutné 8krát cyklus opakovat. Po dokončení simulace v klimatické komoře byla odečtena hodnota  $76,096 \text{ kWh/m}^2$ , která zhruba odpovídala 15 dní přímého slunečního svitu. Celková doba testu byla 20 dní, a kdyby měla probíhat za normálních podmínek, tak s průměrným denním svitem 8,6 hodiny za letní měsíce by test trval 56 dní. [31]

Pro měření v klimatické komoře byla zvolena testovací tělesa, která byla posléze podrobena mechanickým zkouškám. Pro měření byla zvolena tělesa PLA HTPRO, ASA a HIPS. Uložení zkušebních těles v klimatické komoře je znázorněno na obr. 26.



Obr. 26 Zobrazení uspořádání těles v klimatické komoře

## 8.4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ V KLIMATICKÉ KOMOŘE

Hodnocení bylo rozděleno do dvou vizuálních kategorií. První hodnocení bylo hodnocení deformace, kontrola rozměrů a kontrola ztráty původní barvy. Druhé hodnocení bylo založeno na zkoumání pod optickým mikroskopem, které proběhlo jen pokud těleso nešlo zhodnotit dostatečně okem. Pro toto měření bylo podstatné, že jen materiál ASA je odolný proti UV záření, a tudíž by neměly být pozorovány žádné změny.

### 8.4.1 VYHODNOCENÍ PLA HTPRO PLASTIKA TRČEK

Do komory bylo umístěno 12 vzorků materiálu PLA. První 3 vzorky nebyly vyžihány a další vždy prošly půlhodinovým procesem žihání. Na obrázku č.27 a č.28 lez vidět testovací tělesa, která nebyla žíhaná. Na nežíhané těleso působí vnitřní pnutí, které těleso deformuje. Tato deformace vznikla vlivem sálání tepla od lamp komory. Zkušební tělesa byla umístěna na ocelovém plátu komory, který je ochlazován dmychadlem. Tělesa byla chlazená ze spodní strany a z horní strany byla ohřívána, což mělo za následek měknutí horních vrstev zkušebního tělesa, které se začaly smršťovat.



*Obr. 27 Ukázka deformovaného tělesa, které nebylo vyžiháno*



*Obr. 28 Ukázka deformovaného tělesa, které nebylo vyžiháno*

Na obr. č.29 lze vidět zkušební tělesa žíhane na 60 °C. Na první pohled už lze říci, že vlivem žíhání jim bylo sníženo vnitřní pnutí a tím pádem nedocházelo k větším průhybům. Průhyb po změření posuvným měřítkem byl 1,6-1,9 mm a rozměry zkušebního tělesa zůstaly nezměněny.



*Obr. 29 Ukázka deformace tělesa žíhaného na 60 °C*

Nejlépeších výsledků dosahovalo zkušební těleso při žíhání na 90 °C, kdy bylo vnitřní pnutí sníženo na takovou míru, že těleso nejevilo žádné známky průhybu, což je vidět na obr. č. 30. Zkušební tělesa, která byla vystavena žíhání více než 80 °C po cyklech v komoře začaly mít lesklý povrch, který byl podobný zkušebním tělesům, která byla tisknuta na 3D tiskárně na teploty okolo 235 °C. Při tisku PLA na teplotu vyšší než 230 °C sice získáme lesklejší povrch, ale začnou se projevovat nepřesnosti tisku, tudíž pokud by bylo potřeba vytvořit lesklý povrch, tak je lepší těleso vytisknout při teplotě do 220 °C a následně ho vyžít alespoň na 90°C.



*Obr. 30 Ukázka nedeformovaného tělesa po žíhání na 90 °C*

#### **8.4.2 VYHODNOCENÍ MATERIÁLU HIPS PLASTIKA TRČEK**

Jako druhý materiál pro zkoušky byl vybrán HIPS, protože je známý malou odolností proti UV záření. Tento materiál na slunci křehne, praská a ztrácí svou původní barvu. Již po prvním cyklu, který trval 60 hodin, bylo znatelné žloutnutí materiálu. Na obrázku 31 je zobrazen nežíhaný materiál. Lze vidět, že materiál se mírně prohýbá a to od 2,8 do 3,6 mm. Materiál žloutne vlivem fotooxidace, která vede k degradaci některých vazeb polymerů, protože HIPS pohlcuje UV záření kratší než 320nm.



*Obr. 31 Ukázka deformace nežíhaného zkušebního tělesa HIPS*

Průhyb byl zaznamenán jen u zkušebního tělesa, které nebylo žíháno. Ostatní tělesa neztrácely tvar ani rozměry. Na obrázku č. 32 jsou zobrazeny tělesa, která za sebou mají 6 cyklů v klimatické komoře, což odpovídá 360 hodinám přímého slunečního svitu. Těleso je značně nažloutlé a místy se začaly objevovat trhliny a popraskané vrstvy.



*Obr. 32 Ukázka degradace tělesa po 6 cyklech v klimatické komoře*

#### **8.4.3 ZHODNOCENÍ MATERIÁLU ASA**

Materiál ASA je známý svou velkou odolností proti UV záření, což se v komoře potvrdilo, protože i po dokončení všech cyklů vypadal vizuálně stále stejně a nebyla pozorována žádná změna rozměrů. Na obrázku 33. lze vidět vyžíhaná tělesa, přičemž horní těleso bylo umístěno do komory a spodní těleso bylo pouze vyžíháno.



*Obr. 33 Ukázka těles z materiálu ASA (horní těleso bylo v komoře a spodní bylo jen vyžíháno)*



## 9. TAHOVÉ ZKOUŠKY

V této kapitole jsou popisovány zařízení pro tahové zkoušky, průběh měření, zpracování dat z měření a vyhodnocení měření. Pro trhací zkoušky byly zvoleny tři materiály, které byly upraveny žiháním a byly umístěny do klimatické komory na degradaci. Na tahové zkoušky 3D tištěných dílů bohužel nejsou vypracovány příslušné normy, a proto byla pro zkoušky zvolena norma ČSN EN ISO 527-2.

### 9.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU PLA HTPRO

Měření probíhalo na univerzálním zařízení Zwick/Roell Z010 TE, který je schopen vyvinout sílu až 10kN a je využíván hlavně pro nekovové a polymerní materiály. Zařízení pro testy je zobrazeno na obr.č.34. Měření probíhalo na 8 sadách vzorků. V každé sadě byly tři vzorky pro průměrování měření. Ukázka vzorku je na obr. č.35.



*Obr. 34 Univerzální měřicí přístroj Zwick/Roell Z010 TE*



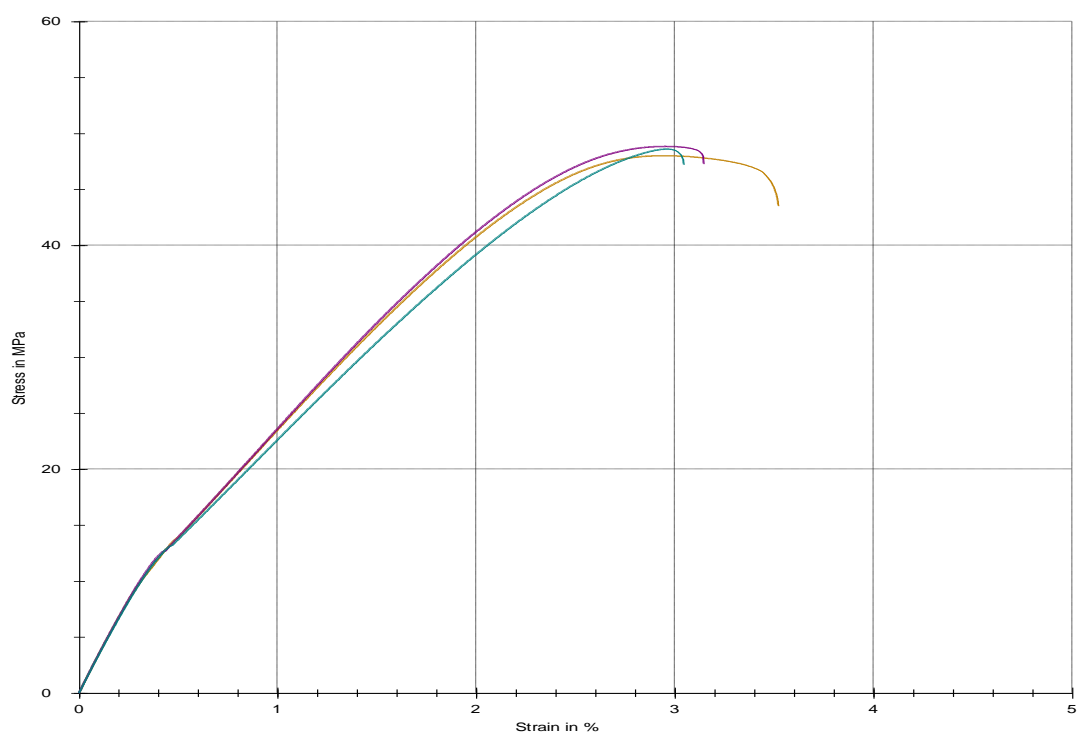
Obr. 35 Ukázka vzorků materiálu PLA HTPRO

Nastavení tahové zkoušky spočívalo v nastavení rychlosti pohybu ramene, která byla odbornou obsluhou stanovena na 10 mm za minutu. Přístroj Zwick/Roell Z010 TE zaznamenává veškeré naměřené hodnoty do tabulky č.27. V tabulce jsou hodnoty naměřené z tahové zkoušky jak pro materiály, které byly v komoře, tak i pro materiály, které v komoře nebyly. Z tabulky lze vidět, že u nevyžíhaných materiálů, lze odečíst mez kluzu. Z tohoto měření lze usoudit, že zkušební tělesa, které prošly žiháním, ale nebyly umístěny do komory jsou pevnější v tahu zhruba o 3MPa, ale ztratily svou tažnost. Tuto skutečnost lze vyčíst i z grafu č.9 a č.10. Z tabulky č. 27, lze také vyčíst, že zkušební tělesa, která byla umístěna po žihání do klimatické komory nebyla UV zářením ovlivněna a rozdíly naměřené tahovou zkouškou byly způsobeny vysokou rychlostí pohybu ramene při zkoušce. Veškeré naměřené tahové diagramy jsou v příloze č. 2.

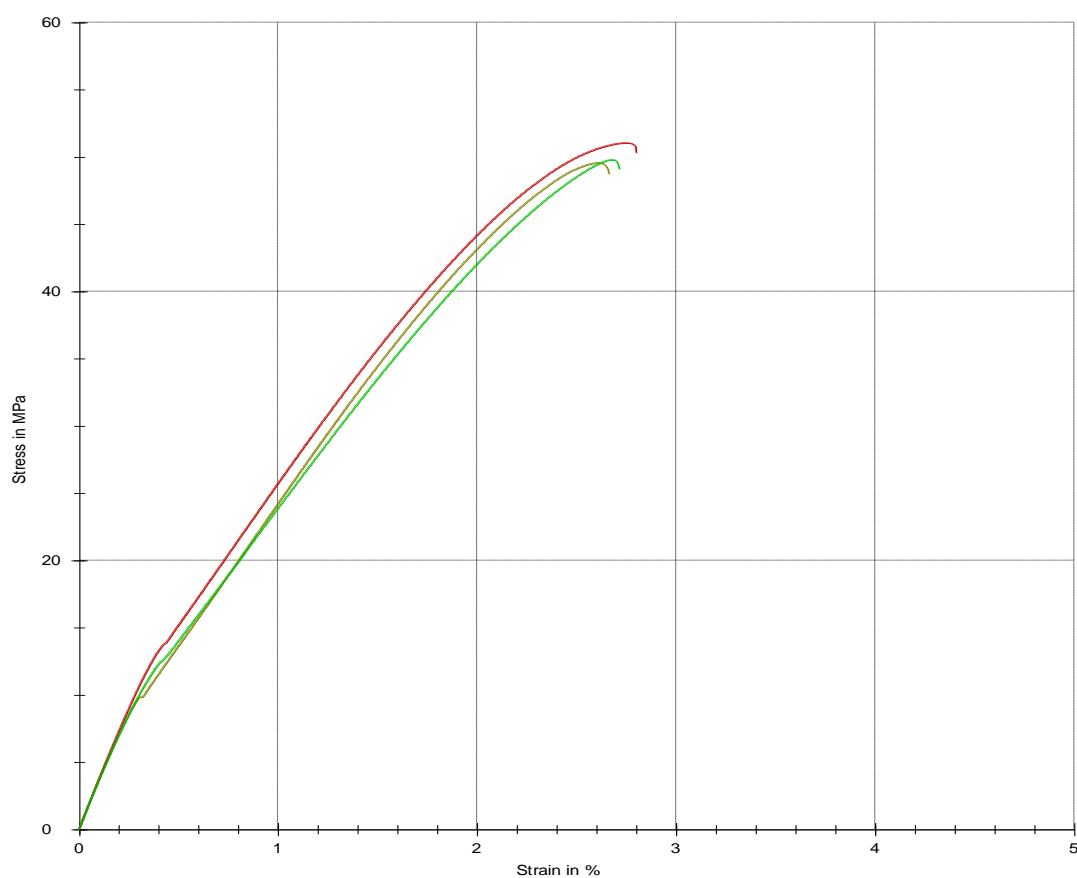
Tabulka 27 Naměřených a vypočtených hodnoty pro materiál PLA HTPRO

Komora	Teplota žihání [°C]	Číslo série	Číslo vzorku	Mez kluzu [MPa]	Protažení na mezi kluzu [%]	Maximální napětí [MPa]	Protažení při maximálním napětí [%]	Napětí při přetržení [MPa]	Protažení při přetržení [%]	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]
NE	0	1	6	47,7	3,1	47,7	3,1	38,5	4,4	9,9	3,6
			7	46,2	2,9	46,2	2,9	38,5	3,6	10,1	3,6
			8	46,8	3	46,8	3	38,5	3,7	10,1	3,6
NE	80	2	17	-	-	47,3	2,3	47,3	2,3	10,0	3,6
			18	-	-	50,4	2,9	50,4	3	9,9	3,5
			19	-	-	50,2	2,8	50,2	3,1	9,9	3,6
NE	100	3	3	-	-	49,3	2,6	49,3	2,6	10,0	3,5
			4	-	-	50,4	2,7	50,4	2,7	9,9	3,6
			5	-	-	50,2	2,5	50,2	2,5	9,8	3,6
NE	120	4	20	-	-	50,4	2,4	50,4	2,3	9,9	3,4
			21	-	-	50,5	2,6	50,5	2,2	10,1	3,5
			22	-	-	50,8	2,4	50,8	2,2	9,9	3,5
ANO	0	5	11	46,3	3,0	46,3	3,0	43,5	3,5	9,9	3,6
			12	46,2	3,0	46,2	3,0	46,2	3,0	9,8	3,6
			13	46,1	3,3	46,1	3,0	46,3	3,0	9,9	3,7
ANO	80	6	14	-	-	49,2	2,6	49,5	2,6	9,8	3,5
			15	-	-	51,0	2,7	51,0	2,7	9,8	3,5
			16	-	-	49,4	2,7	49,8	2,7	9,8	3,5
ANO	100	7	23	-	-	48,2	2,2	48,5	2,2	9,9	3,8
			24	-	-	48,2	2,2	48,4	2,2	9,9	3,8
			25	-	-	47,6	2,0	47,6	2,0	9,9	3,8
ANO	120	8	8	-	-	48,0	2,1	48,0	2,1	9,7	3,5
			9	-	-	48,1	2,2	47,1	2,2	9,8	3,6
			10	-	-	48,2	2,2	47,2	2,2	9,9	3,5





*Graf 9 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (nežiháno, komora ANO)*



*Graf 10 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 80 °C, komora ANO)*

## 9.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU HIPS

Zkouška probíhala na zařízení TEMPOS ZD20/200 kN, které je zapojeno přes řídicí jednotku do PC. Data se následně zpracovávají v programu M TEST 1.7. Přístroj lze vidět na obr. č. 36 Přístroj TEMPOS je schopen zaznamenávat pouze sílu  $F$  [N] a vzdálenost  $s$  [mm], která udává, jak se od sebe během měření vzdálily upínací kleštiny.



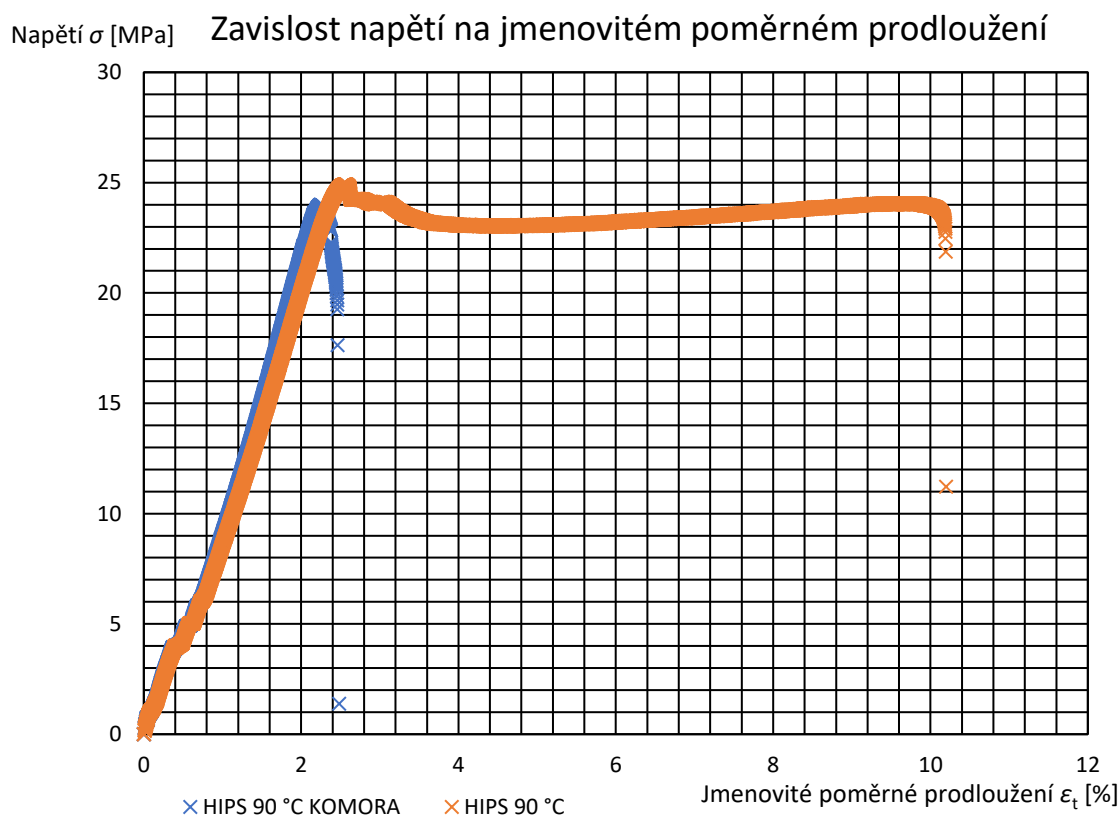
*Obr. 36 Přístroj pro tahové zkoušky TEMPOS ZD20/200 kN*

Stejně jako u materiálu PLA bylo použito 24 zkušebních těles, která byla pomocí tahového zařízení roztrhnuta. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č.28. Z naměřených dat lze vyčíst, že žíhání u tohoto materiálu mělo za následek zhoršení mechanických vlastností materiálu. Z tabulky vidíme, že tělesa, která byla v komoře, jsou schopna vydržet protažení jen kolem 2,5% měřené délky. Tělesa, která nebyla degradována v komoře jsou daleko pružnější a jsou schopna se natahovat až 10 %. Tělesa, která nebyla v komoře mají výraznou mez kluzu, která byla odečtena z grafu a zaznamenána do tabulky č. 28.

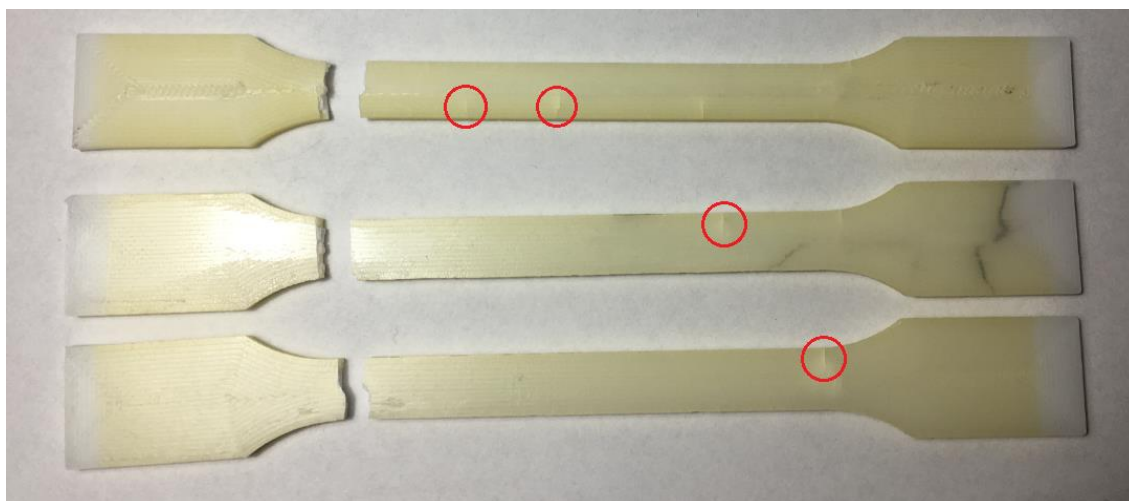
Tabulka 28 Naměřených a vypočtených hodnoty pro materiál HIPS

Komora	Teplota žihání [°C]	Číslo série	Číslo vzorku	Mez kluzu [MPa]	Protažení na mezi kluzu [%]	Maximální napětí [MPa]	Protažení při maximálním napětí [%]	Napětí při přetržení [MPa]	Protažení při přetržení [%]
NE	0	1	A1	25,8	2,8	25,8	2,8	24,0	10,1
			A2	25,1	2,6	25,1	2,6	21,7	11,6
			A3	24,3	4,2	24,6	12,2	23,2	12,5
NE	70	2	B1	25,0	2,8	25,7	12,4	24,4	12,8
			B2	25,6	2,6	25,6	2,6	18,3	9,2
			B3	N	N	N	N	N	N
NE	80	3	C1	25,5	2,6	25,5	2,6	15,5	10,1
			C2	25,3	2,8	25,3	2,8	17,6	10,0
			C3	25,5	3,0	25,5	3,0	23,4	9,1
NE	90	4	D1	24,7	2,8	24,7	2,8	22,8	10,9
			D2	24,9	2,6	24,9	2,6	21,9	10,2
			D3	25,2	2,7	25,2	2,7	23,9	11,5
ANO	0	5	E1	N	N	24,0	2,4	22,2	2,6
			E2	N	N	24,0	2,5	17,8	2,7
			E3	N	N	24,7	2,5	17,6	2,9
ANO	70	6	F1	N	N	22,7	2,4	21,4	2,5
			F2	N	N	23,8	2,4	22,6	2,5
			F3	N	N	22,1	2,4	18,6	2,7
ANO	80	7	G1	N	N	18,1	2,0	15,5	2,1
			G2	N	N	24,0	2,3	19,3	2,5
			G3	N	N	21,2	2,2	19,9	2,2
ANO	90	8	H1	N	N	18,1	1,9	15,5	2,1
			H2	N	N	24,0	2,3	19,3	2,5
			H3	N	N	21,1	2,2	19,9	2,2

V grafu č.11. lze vidět, že ze začátku měření se obě zkušební tělesa chovají velice podobně a v první části zhruba do 2 % jmenovitého poměrného prodloužení platí elastická deformace, a tudíž i Hookův zákon. Přibližná hodnota bodu úměrnosti byla stanovena na 24 MPa pro obě zkušební tělesa. Za tímto bodem dochází k roztržení zkušební tělesa, které bylo degradováno za pomoci klimatizační komory. Zkušební těleso, které nebylo degradováno se začne plasticky deformovat a k přetržení dochází až kolem 10 % jmenovitého poměrného prodloužení. Tento rozdíl vznikl vlivem působení UV a IR záření. UV záření je nebezpečné pro materiál, protože způsobuje fotolýzu. UV záření způsobí, že se makromolekuly rozpadají na menší vlivem porušení vazby mezi dvěma atomy v řetězci. Dále UV záření způsobuje fotooxidaci. Oxidační reakce nejprve působí na povrchu tělesa, ale postupně se dostane až do hloubky. Oxidace způsobí chemické změny ve struktuře polymerů a tím dochází k síťování makromolekul. Materiál je poté křehčí, ztratí svou pružnost a při namáhání vznikají v materiálu trhliny, jako na zkušebním tělese, které lze vidět na obr.37. Všechny tahové diagramy jsou zaneseny do přílohy č. 3. [32]



Graf 11 Zobrazení tahového diagramu pro materiál HIPS 90 °C a HIPS 90 °C komora



Obr. 37 Zobrazení mikrotrhlin materiálu HIPS

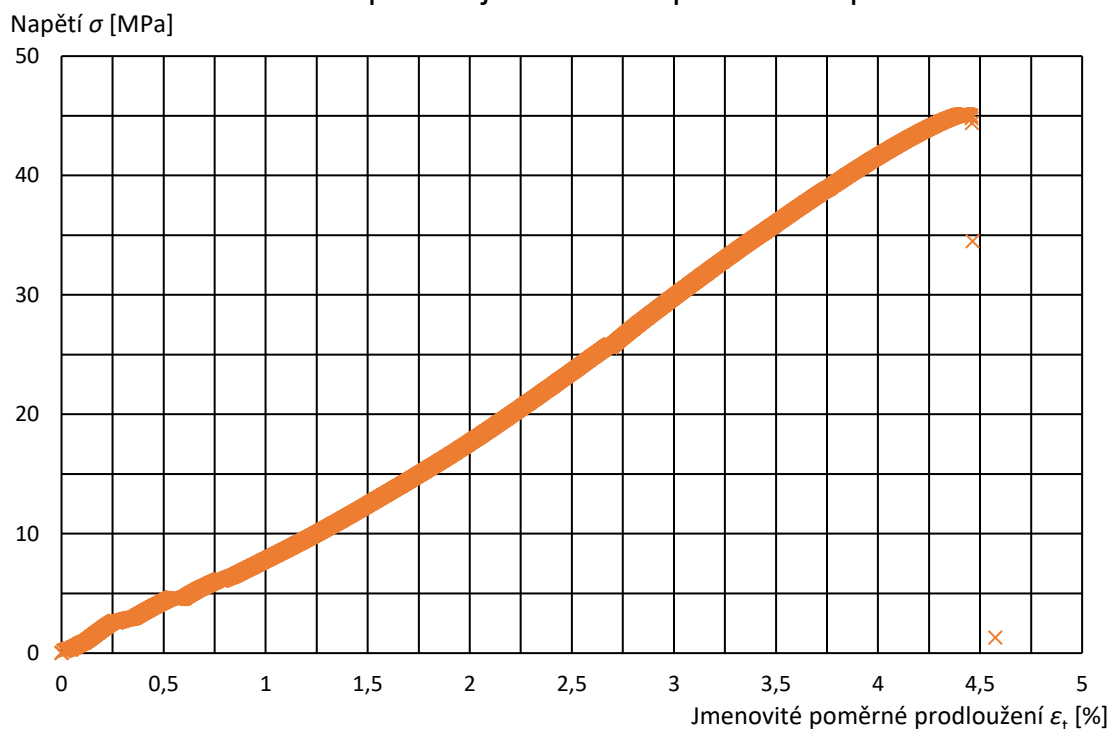
### 9.3 TAHOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU ASA

Pro materiál ASA probíhala zkouška stejně jako pro materiál HIPS, jen s rozdílem počtu vzorků. Pro tahové zkoušky byly vybrány vzorky, které by měly vykazovat největší rozdíly. Vybrané vzorky lze vidět v tabulce č.29. Z tabulky lze vyčíst, že materiál ASA není ovlivněn UV zářením a po 480 h v klimatické komoře u něj není měřený vliv fotolýzy ani fotooxidace. Na materiál neměla vliv ani tepelná degradace, a tudíž se tento materiál hodí na výrobu dílů, které budou mimo interiér. Hodnoty z tabulky č.29. byly zprůměrovány a vyneseny do grafu č.12. Na grafu lze pozorovat, že materiál je pevný, ale křehký. Materiál vykazuje porušení bez meze kluzu, která tudíž nešla odečíst.

Tabulka 29 Naměřených a vypočtených hodnoty pro materiál ASA

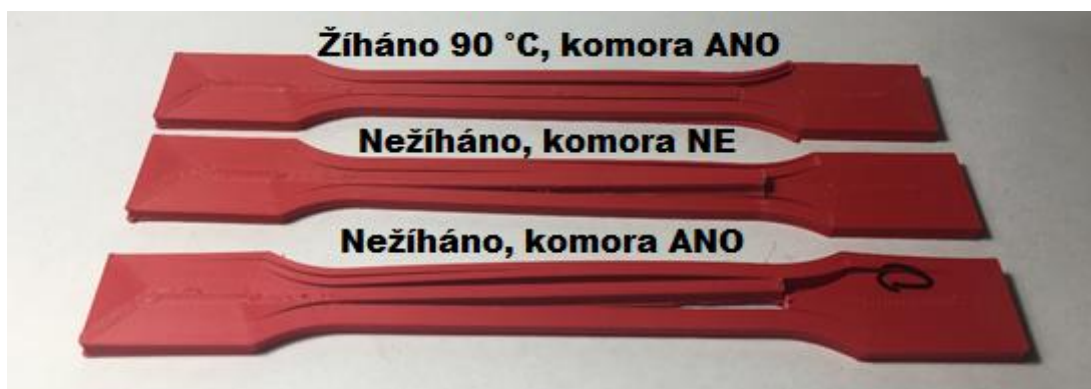
Komora	Teplota žíhání [°C]	Číslo série	Číslo vzorku	Mez kluzu [MPa]	Protažení na mezi kluzu [%]	Maximální napětí [MPa]	Protažení při maximálním napětí [%]	Napětí při přetržení [MPa]	Protažení při přetržení [%]
NE	0	1	CH	N	N	45,1	4,4	44,4	4,5
				N	N	45,2	4,5	45,0	4,6
				N	N	44,9	4,4	44,2	4,5
ANO	0	5	I	N	N	46,1	4,7	42,3	4,8
				N	N	45,9	4,7	44,2	4,9
				N	N	45,8	4,6	44,9	4,7
ANO	90	8	J	N	N	43,8	4,2	42,4	4,3
				N	N	44,4	4,4	43,8	4,5
				N	N	44,5	4,4	43,2	4,4

### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení



Graf 12 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 0 °C, Klimatická komora NE)

Materiál ASA, jak lze vidět na obrázku č.38. praská od středu zkušebního tělesa, což značí nedostatečné žihání materiálu, který byl vyžihán jen na okrajích zkušebního tělesa, a proto došlo při tahové zkoušce ke zborcení tělesa od středu. Tento jev se objevil u všech testovaných těles, tudíž nelze tvrdit, že tento jev zapříčinila degradace v komoře pomocí UV záření.



Obr. 38 Roztržená tělesa z materiálu ASA

## 10. PŘÍPADOVÉ STUDIE

V této části práce jsou vyhotoveny případové studie různých dílů pro automobilový průmysl a servis. Případové studie většinou stručně popisují, jak zákazníkům daný produkt nebo technologie pomohla a kolik jim ušetří času a finančních prostředků nebo kolik vyřeší problémů.

### 10.1 DRŽÁK ALTERNÁTORU

Tato případová studie bude porovnávat výrobu zakázkové plastové spojky pro alternátor závodního vozu. Mělo být vyrobeno 25 ks této spojky pro servis v případě zničení originálního dílu. Studie je zaměřena na porovnání ceny, vlastností a času vyhotovení originálního dílu třemi různými způsoby. Původní díly jsou ze sériové výroby, která používala vstřikování plastu ABS. Tento prvek se již nevyrábí. K dispozici jsou tudíž tyto tři možnosti výroby dílu. Díl je zobrazen na Obr. 39.



*Obr. 39 Držáky alternátoru vyrobené různými metodami shora: SLA, FDM, vstřikování*



### 10.1.1 PRŮMYSLOVÝ 3D TISK FDM ABS

Průmyslový 3D tisk FDM má vysokou opakovatelnost a dokáže vyrábět díly s vysokou rozměrovou přesností. Je schopen tisknout díly v malých až středních dávkách. Náklady na ABS vlákno používané v průmyslových FDM systémech se obvykle pohybují kolem 220 – 300 Kč za kg. Hlavním omezením pro jakoukoli součást vyrobenou pomocí 3D tisku FDM je její anizotropní mechanická pevnost. Součásti jsou v jednom směru výrazně slabší, a to znamená, že designér musí mít dobrý přehled o zatížení, kterému bude díl vystaven, a o orientaci modelu v tiskové ploše. Tato technologie je nejjednodušší a dá se realizovat kdekoli. Díky této výhodě lze mít prvky připravené za pár hodin k montáži, což je v motorsportu velká výhoda.

### 10.1.2 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ ABS S 3D VYTIŠTĚNÝMI FORMAMI SLA

Vysokoteplotní SLA pryskyřice jsou schopny vyrábět funkční vstřikovací formy s vysokou úrovní přesnosti, které jsou nejvhodnější pro nízké výrobní úrovně. Maloobchod s pryskyřicemi SLA se pohybuje kolem 2000 - 5500 Kč za litr. Pro výpočty v tomto příkladu byl použit stolní vstřikovací stroj s 3D tištěnými formami vloženými do hliníkových nosných rámců.

### 10.1.3 TRADIČNÍ VSTŘIKOVANÉ DÍLY Z ABS

Tradiční vstřikované díly mají velmi vysokou přesnost, vynikající povrchovou úpravu a velmi vysokou opakovatelnost. Hlavní nevýhody tradičního vstřikování jsou vysoké počáteční náklady na nastavení a počet konstrukčních omezení vynucených při navrhování tvarovaného dílu (úhly úkosu, konstantní tloušťka stěny atd.). Cena peletek ABS se pohybuje kolem 60 – 120 Kč za Kg. Shrnutí nákladů (na základě online nabídek) na výrobu dílů ABS pomocí výše diskutovaných technologií je uvedeno v následující tabulce. Všechny ceny nezahrnují dopravu a DPH.

### 10.1.4 ZHODNOCENÍ

V této části je shrnutí nákladů (na základě online nabídek) na výrobu dílů z ABS pomocí výše diskutovaných technologií. Všechny ceny nezahrnují dopravu.

Z důvodů anizotropních mechanických vlastností se nebere v potaz natočení dílů a využívá se vždy strana, která má největší mechanickou pevnost. Meze pevnosti jsou jen orientační, protože nebylo použito přesného měření. Z výsledné tabulky 30, lze usoudit, že největší pevnost mají vstřikované díly, které ale vychází mnohokrát draž. Nejmenší pevnosti dosahuje metoda FDM, ale cenově vychází nejlevněji, a proto taky byla zvolena na výrobu.

Tabulka 30 Zhodnocení výrobního procesu

	Průmyslové FDM	SLA + forma	Tradiční vstřikování materiálu
Náklady na formu	N/A	1 650 Kč	29 000 Kč
Náklady na díl	40 Kč	2,6 Kč	2 Kč
Celkové náklady	1 000 Kč	1 715 Kč	29 050 Kč
Dodací lhůta	1 den	8dní	30 dní
Mez pevnosti v tahu	31,2 MPa	39,8 MPa	45,2 MPa



## 10.2 MATICE FILTRU

Tato případová studie pojednává o možnostech výroby matice filtru. Tato matice nelze zakoupit zvlášť a je potřeba koupit vždy celý filtr. Filtr je poptáván jen ve velmi malém množství, a to v jednotkách kusů. Filtr musí odolávat mechanickému a tepelnému namáhání, které je vyvoláno tlakem je filtru. Tato případová studie popisuje jak technologii, tak i zakoupení zařízení a finanční návratnost. Matice je zobrazena na obr. č. 40. Nejdůležitější pro tento prvek je funkčnost a cena. Dosavadní výroba byla prováděna vstřikováním plastu do formy.



*Obr. 40 Matice filtru tištěna metodou FDM*

### 10.2.1 PRŮMYSLOVÝ 3D TISK FDM ZA POUŽITÍ RŮZNÝCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

Na základě dřívějších zkušeností byla jako první varianta zvolena technologie FDM. Technologie je levná a čas na výrobu je nejmenší ze všech ostatních variant. Největší problém je anizotropní vlastnost FDM tisku. Existují jen dvě rozumné varianty natočení tisku a ty jsou zobrazeny na obr. č.40. Při tomto nastavení je díl nejslabší v ose Z, na kterou působí při přitahování největší síla. Tento prvek neměl dokumentaci, tak bylo provedeno skenování prvku a následně byl model v programu meshmixer upraven do finální podoby.

Pro tuto studii byla vybrána tiskárna Ultimaker S3, která splňuje parametry tisku a na trhu se pohybuje za nejnižší cenu. Tato tiskárna byla zvolena, protože má dvě hlavy a tím pádem může tisknout podpory tisku a hlavní tištěný díl zároveň. Tiskárna se bude dát využít i na další díly pro výrobu. Jako materiál byl zvolen Nylon PA/CF od firmy Innovatefil.

### 10.2.2 SLA TISK

Tato metoda je daleko přesnější než metoda FDM tisku a dosahuje výrazně lepších anizotropních vlastností. Nevýhodou této metody je čas výroby, který je až dvojnásobný, oproti FDM tisku. Pro výrobu byla zvolena tiskárna Formlabs Form 3. Tato tiskárna byla vybrána, protože má dostatečně velký stůl pro matici a na trhu se pohybuje cenově nejvýhodněji. Jako materiál byl zvolen Formlabs RIGID resin, který odolá tepelnému i mechanickému namáhání.

### 10.2.3 3D TISK KOMPOZITŮ METODOU FFF+CFF

Varianta tisku kompozitních materiálu je zde zanesena, protože by se dala využít pro všechny výrobky, které byly doposud zmíněny. Hotové výrobky jsou o 40% lehčí než hliník 6061 a mají podobnou pevnost. Tiskárna kompozitu je od firmy Markforged a vyrábí se v několika provedeních.

### 10.2.4 ZHODNOCENÍ

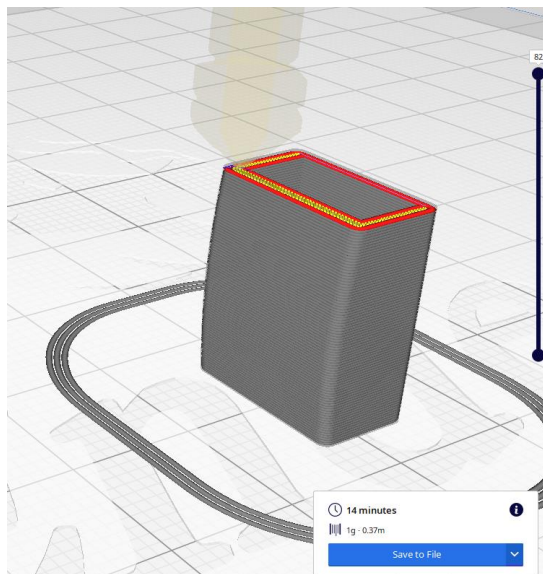
V této části je shrnutí nákladů (na základě online nabídek) pomocí výše diskutovaných technologií. Všechny ceny nezahrnují dopravu. Při vyhodnocování byl brán jako hlavní aspekt cena. Do ceny se zahrnovala cena technologie, cena materiálu na tisk, cena práce na vyhotovení výrobků a cena práce za koncové úpravy. Z toho byla vypočítána doba návratnosti a čas, za který se investice vrátí. Poněvadž se jedná o malosériovou výrobu, tak je nutné využít tiskárnu ještě na jiné prvky ve výrobě. Počítáno je s výměnou 2ks filtrů do měsíce, přičemž cena filtru se pohybuje kolem 30 000 Kč. Pro návrh tisku byly zvoleny technologie, FDM, SLA a FFF+CFF. Všechny ceny jsou soustředěny do tabulky č.31 a je vypočtena návratnost investice. Nejlépe vyšla investice do tiskárny SLA, která má nejkratší návratnost. Jako druhá nejlepší varianta vyšla metoda tisku FDM, která je dle studie provedené ve firmě lepší variantou, protože bude méně zaměstnávat obsluhu 3D tiskárny.

Tabulka 31 Zhodnocení návratnosti investice

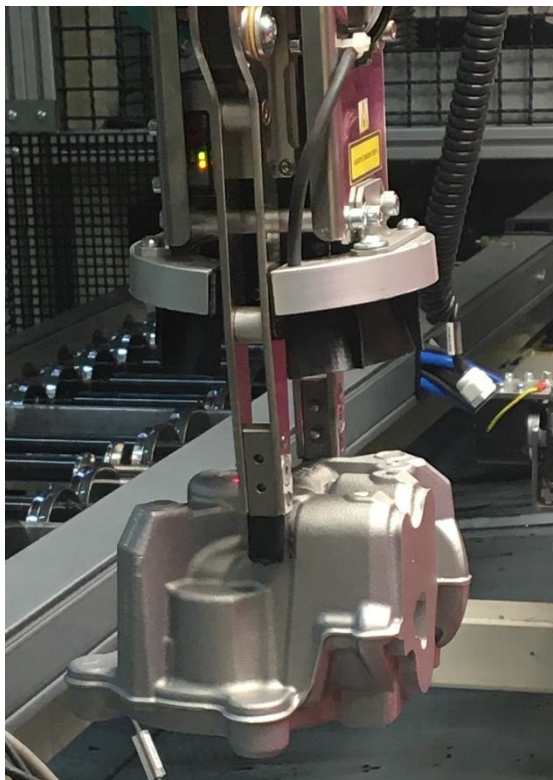
Náklady	Průmyslové FDM	FFF+CFF	SLA
Pořízení technologie	119 669 Kč	228 999 Kč	108 888 Kč
Cena filamentu za 1 kg	1 660 Kč	3 200 Kč	-
Cena pryskyřice za 1 l	-	-	6 552 Kč
Čas koncové úpravy 1ks	1 h	1 h	2 h
Cena koncové úpravy	200 Kč	200 Kč	400 Kč
Dodatkové položky cena za kus. (obsahuje Izopropylalkohol, brusné načiní, lepidla.	50 Kč	-	10 Kč
Celkové náklady za kus	416 Kč	520 Kč	1 065 Kč
Měsíční úspora	29 584 Kč	29 480 Kč	28 935 Kč
Návratnost investice	4 měsíce	7,8 měsíce	3,8 měsíce

## 10.3 BOSCH ÚCHOPOVÝ PRST ROBOTA

V této případové studii bylo zapotřebí navrhnout technologie a principy na výrobu krytu uchytávacího prstu robota Staubli. Případová studie vznikla v návaznosti na zpožděné dodávky těchto dílů. Originální díly byly na stupnici tvrdosti SHORE A 92, a tudíž bylo zapotřebí navrhnout takové technologie a materiály, které by měly podobnou hodnotu tvrdosti na stupnici SHORE. Tyto díly jsou rozměrově velice malé, a tudíž tisk trvá jen několik desítek minut, což lze vidět na obr. č.41. Automatizovaný robot s prsty je na obr. č.42.



*Obr. 41 Kryt uchopovacích kleštín zamezujúci poškrábaní výsledného produktu*



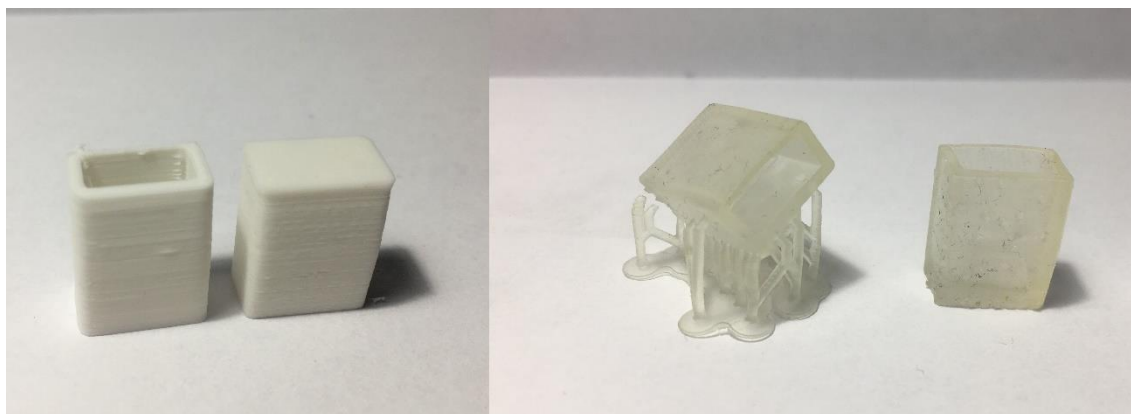
*Obr. 42 Tištěné kryty uchopovacích prstů automatické linky*

### **10.3.1 METODA 3D TISKU FDM**

Metoda FDM tisku byla vybrána, protože FDM tisk je nejlevnější a nevyžaduje téměř žádné konečné úpravy. Metoda FDM tisku je nejrychlejší, když se tiskne prvek po jednom kusu. Pokud se umístí na platformu více dílů zároveň, tak s množstvím přidávaných dílů roste lineárně i čas tisku. Pro výrobu byla zvolena tiskárna Prusa MK3S+, která je díky direct systému schopna bez problému podávat pružný filament do trysky. Jako materiál byl zvolen Flexfil od společnosti Fillamentum.

### 10.3.2 SLA TISK

Tato metoda byla zvolena, protože je to jedna z nejlevnějších metod, s kterou se dá tisknout malé předměty bez větší změny původních rozměrů. Tisk jednoho kusu je sice dvakrát pomalejší než tisk na FDM tiskárně, ale když se zaplní celá platforma tiskárny prvky na tisk, tak se rychlost výrazně přiblíží FDM tisku a výsledný tisk bude jen o pár minut delší. Pro tisk malých objektů není potřeba velké platformy, tudíž i cena tiskárny je velice nízká. Pro výrobu by byla zvolena tiskárna Anycubic Photon, která funguje na principu DLP. DLP tiskárna má displej pod nádrží s resinem a vytvrzuje vždy celou jednu vrstvu, a tudíž nezáleží, jestli je na platformě prvek jeden nebo dvacet, protože tisk trvá stejnou dobu. Pro tisk byl zvolen resin Photocentric o tvrdosti Flexi - tvrdost 85 ShD. Tento materiál je podobně tvrdý jako materiál originálního dílu, ale jeho tvrdost se dá ovlivnit při vypékání v UV komoře. Nevýhoda této metody je následná konečná úprava, ve které je nutné umýt prvky v izopropylalkoholu a následně je nechat vytvrdit v UV komoře. Vytisknuté vzorky krytů jsou na obr. č. 43.



*Obr. 43 Tištěné kryty uchopovacích kleští (vlevo FDM technologie, vpravo SLA technologie)*

### 10.3.3 ZHODNOCENÍ

V této části je shrnutí nákladů (na základě online nabídek) pomocí výše diskutovaných technologií. Všechny ceny nezahrnují dopravu.

Při vyhodnocování byl brán jako hlavní aspekt cena. Do ceny se zahrnovala cena technologie, cena materiálu na tisk, cena práce na vyhotovení výrobků a cena práce za koncové úpravy.

Zhodnocení probíhalo pro výrobu 30 ks tohoto dílů měsíčně. Díly dle zkoušek podléhají opotřebení podobně jako originální díly, a tudíž nemusí být brán zřetel na opotřebení. Dle tabulky nejlépe vyšla technologie SLA tisku s návratností už za 5 měsíců. Bohužel dle studie, kterou jsem provedl není moc dalších dílů ve firmě, které by šly tisknout metodou SLA, a tudíž bych volil metodu FDM, která už ve firmě funguje a nebude potřeba proškolit personál. Zhodnocení je zaneseno v tabulce 32.

Tabulka 32 Zhodnocení návratnosti investice

Náklady	Hobby FDM	SLA	Originální díl
Pořízení technologie	19 999 Kč	12 999 Kč	-
Cena filamentu za 1 kg	1 800 Kč	-	-
Cena filamentu na 1ks	2 Kč	2,5 Kč	
Cena pryskyřice za 1 l		2 120 Kč	-
Čas koncové úpravy pro 30 ks	1 h	4 h	-
Cena koncové úpravy pro 30 ks	200 Kč	800 Kč	-
Dodatkové položky cena za 30ks (obsahuje Izopropylalkohol, brusné načiní, lepidla)	10 Kč	10 Kč	-
Celkové náklady za ks	18,66 Kč	39,17 Kč	125 Kč
Celkové náklady na 30 ks	560 Kč	1175 Kč	3 750 Kč
Měsíční úspora	3 190 Kč	2 575 Kč	-
Návratnost investice	6,3 měsíců	5 měsíců	-

## 10.4 DRŽÁKY OPTICKÉHO ČIDLA

Tato studie byla zhotovena, kvůli často měněným optickým čidlům na strojích. Čidla se mění z důvodu použití mazací kapaliny Palatinol N, který má tendenci měkčit polymerní materiály. Nejprve byly vybrány materiály, které jsou schopné odolávat různým chemikáliím. Z těchto materiálů byla vytištěna zkušební tělesa, které byla následně umísťovány do Palatinolu N. Tělesa trávila 12 hodin ponořená v Palatinolu a 12 hodin byly umístěna do klimatické komory. Tento proces se opakoval 14 dní. Tyto zkušební tělesa byla poté porovnávána s tělesy, která do tohoto procesu nebyla zahrnuta. Měření probíhalo za pomoci tahové zkoušky, aby bylo zjištěno maximální napětí a jmenovité poměrné prodloužení. Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce č.33. Z tabulky vyplývá, že všechny materiály jsou ovlivněné klimatickou komorou nebo mazivem Palatinol N, kromě nylonu s karbonovými vlákny PA/CF. Dosavadní čidla byla vyrobena z hliníku 6061, který má dostatečnou pevnost, ale nehodí se na často obměňovaná čidla s jiným uchycením, protože při změně čidla se musí vyrobit na CNC stroji nový držák. Cena jednoho držáku se pohybuje, dle zařízení, od 380 do 450 Kč při výrobě 12 ks dle aktuálního nacenění.

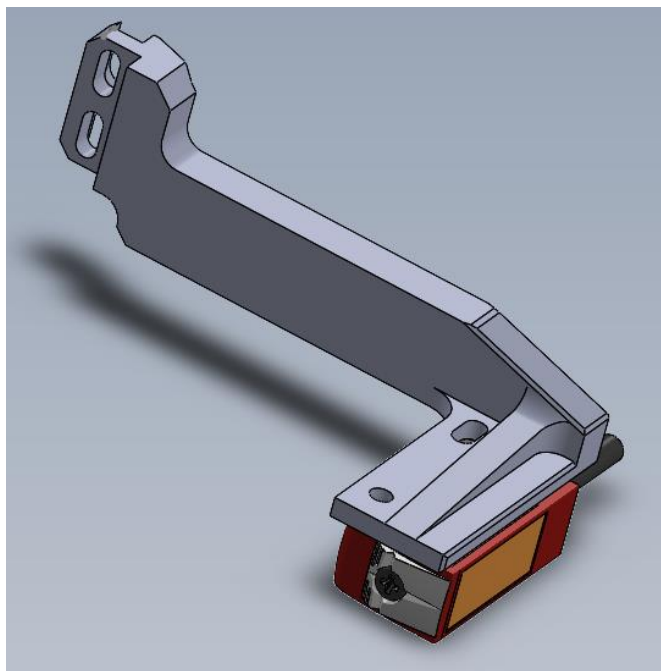
Tabulka 33 Naměřené hodnoty pro různé materiály před a po degradaci

Palatinol N	Komora	Vzorek	Číslo vzorku	Maximální napětí [MPa]	Protažení při maximálním napětí [%]	Napětí při přetržení [MPa]	Protažení při přetržení [%]
NE	NE	ABS	A1	36,2	8,5	35,3	8,7
			A2	36,3	8,6	35,2	8,8
			A3	36,7	8,6	35,9	8,7
ANO	ANO	ABS	B1	33,2	4,8	31,2	4,1
			B2	33,8	4,2	29,9	4,3
			B3	32,9	4,9	30,8	4,2
NE	NE	PET-G	C1	50,3	2,6	50,0	2,9
			C2	49,9	2,7	49,2	3,1
			C3	50,1	2,5	49,3	2,9
ANO	ANO	PET-G	D1	50,1	2,4	45,8	8,2
			D2	50,4	2,6	44,2	9,3
			D3	49,9	2,4	46,2	9,1
NE	NE	PLA HTPRO	E1	47,7	3,1	38,5	4,4
			E2	46,2	2,9	38,5	3,6
			E3	46,2	3,0	38,5	3,6
ANO	ANO	PLA HTPRO	F1	42,6	5,1	36,7	9,2
			F2	43,2	5,4	36,2	9,4
			F3	42,8	5,8	35,9	9,5
NE	NE	PA/CF	G1	171,2	2,2	168,3	2,3
			G2	169,3	2,2	168,1	2,3
			G3	169,8	2,0	168,2	2,3
ANO	ANO	PA/CF	H1	170,2	2,1	168,6	2,4
			H2	169,3	2,2	168,2	2,3
			H3	169,8	2,2	168,4	2,4

#### 10.4.1 VÝROBA METODOU FDM

Tato výroba byla zvolena, protože FDM tiskárna je schopna využívat velké množství materiálů. Velká různorodost materiálů se hodí, když se například změní mazivo ve strojích a stávající materiál nebude vůči tomuto mazivu odolný. Prvky se tisknou jen s malými podporami, a tudíž není zapotřebí druhé tiskové hlavy, která by tiskla levnější podpůrný materiál. Ze součásti je nutné po vytištění sundat podpory a obrousit místo styku podpory s výrobkem. Dále je nutné protáhnout díry vrtákem od nečistot, které vznikly v díře vlivem stringování materiálu. Kdyby se chtělo zamezit finálním úpravám vytištěných dílů, tak by se musela zakoupit průmyslová tiskárna, která má dvě tiskové hlavy a je schopna tisknout podpůrný materiál, který by zamezil změnám rozměrů děr pro uchycení čidla. Jako materiál byl zvolen nylon s karbonovými vlákny PA/CF, který jako jediný z testovaných materiálů nepodléhal degradaci. Všechna čidla musela být překreslena v programu SolidWorks a upravena pro 3D tisk. Celkem bylo upraveno 8 držáků čidel. Ukázka držáku je na obrázku č.44 a č.45.





*Obr. 44 Ukázka navrženého tělesa pro nové čidlo*



*Obr. 45 Ukázka aplikace nového držáku čidla*

Tabulka 34 Zhodnocení návratnosti investice

Náklady	Hobby FDM	Průmyslová FDM	Originální díl
Pořízení technologie	19 999 Kč	119 669 Kč	-
Cena filamentu za 1 kg	1 800 Kč	1 800 Kč	-
Cena filamentu na 1ks	26 Kč	22 Kč	
Čas koncové úpravy pro 12 ks	3 h	0,5 h	-
Cena koncové úpravy pro 12 ks	600 Kč	100 Kč	-
Dodatkové položky cena za 12 ks (obsahuje Izopropylalkohol, brusné načíní, lepidla)	10 Kč	10 Kč	-
Celkové náklady za ks	77 Kč	31 Kč	450 Kč
Celkové náklady na 12 ks	924 Kč	372 Kč	5 400 Kč
Měsíční úspora	4 476 Kč	5 028 Kč	-
Návratnost investice	4,4 měsíce	23,8 měsíce	-

#### 10.4.2 ZHODNOCENÍ

V této části je shrnutí nákladů (na základě online nabídek) pomocí výše diskutovaných technologií. Všechny ceny nezahrnují dopravu.

Při vyhodnocování byl brán jako hlavní aspekt cena. Do ceny se zahrnovala cena technologie, cena materiálu na tisk, cena práce na vyhotovení výrobků a cena práce za koncové úpravy. Zhodnocení vychází z tabulky 34.

Vyhodnocení probíhalo pro 12 ks držáku čidla, protože daný přístroj potřebuje pro správnou funkci právě dvanáct čidel. Nejlépe vychází technologie FDM s tiskárnou Prusa i3 MK3S+, protože návratnost se dá spočítat na dobu okolo pěti měsíců. Při úspěšných testech se technologie použije na více přístrojích a návratnost se výrazně zkrátí. Průmyslová FDM tiskárna se nevyplatí, pokud se bude používat jen jednoúčelně, ale pokud by byla zařazena pro výrobu více prvků, tak se i návratnost průmyslového zařízení Ultimaker S3 výrazně zkrátí. Při využití průmyslové 3D tiskárny bude ušetřeno na servisu tiskárny a tím i na nákladech na personál, který by musel věnovat čas její opravě.



## 11. ZÁVĚR

V diplomové práci se zkoumala aditivní výroba, a to hlavně 3D tisk. V práci jsou rozebírány různé technologie 3D tisku, ke kterým jsou uvedeny příklady použití, jak by mohly doplnit či úplně nahradit klasické výrobní metody. K tiskovým metodám jsou doložené materiály, které jsou nejběžněji používány a jsou k nim uvedeny hlavní parametry a vlastnosti. V prvních rešeršních kapitolách je dále popsáno, jak lze využít 3D tisku v automobilovém průmyslu a jaké úskalí s sebou nese problematika 3D tisku v tomto průmyslovém sektoru. V práci je popsáno, jaké díly lze zhotovit pomocí aditivní výroby, a to buď pro úsporu nákladů na výrobu, anebo pro výrobu prvků, které nelze zhotovit bez 3D tisku.

Nejdůležitější částí práce je zkoumání mechanických vlastností polymerů, kde jsou rozebrány vlastnosti a charakteristiky daných materiálů. Je popsáno mechanické namáhání v tahu, aby bylo možné znalosti použít v praktické části. V praktické části jsou popsány metody na změnu vlastností polymerních materiálů. První část se věnuje žíhání plastů, kde je popsáno, jak žíhání funguje a jaký má vliv na materiál. V této části bylo zjištěno, jak se polymerní materiály deformují při různých teplotách. Výsledky jsou ovlivněny hlavně zkušebními tělesy, která se dají tisknout různými technologiemi. V práci byla zvolena metoda tisku jen za použití perimetrů, aby se zkušební tělesa co nejvíce přiblížila normě pro vstřikování polymerních materiálů. Výsledky z měření se vzdalují hodnotám vstřikovaných plastů hlavně kvůli rozdílné technologii výroby. Při žíhání bylo zjištěno, že materiály PLA se dokážou dlouhodobě udržet v oblasti skelného přechodu, a tím může dojít k dokonalému snížení vnitřního pnutí. Konstrukční materiály se chovaly přesně opačně oproti materiálům PLA. Bylo zjištěno, že při dosažení teploty skelného přechodu se těleso během 5 minut úplně zdeformovalo.

V další části je popsána klimatická komora a jak probíhala degradace různých materiálů. Do komory byly vkládány dva materiály, které podléhají rychlé degradaci a jeden materiál, který je odolný vůči UV záření. Z provedeného zkoumání vyšlo najevo, že materiál PLA HTPRO, který je vyžíhaný, je proti UV záření více odolný, než tvrdí teorie o rozkladu materiálu PLA. Materiál dle studie degradoval daleko pomaleji, a tudíž by bylo lepší nechat materiál v komoře minimálně dvojnásobnou dobu, aby bylo dosaženo věrohodnějších výsledků. Naopak materiál PLA HTPRO, který nebyl vyžíhán se prohnul do tvaru „U“, vlivem vnitřního pnutí. Jediný materiál ASA byl schopen odolat degradaci v klimatické komoře bez pozorované změny. Třetí materiál byl materiál HIPS, který měl silnou tendenci ztrácet barvu a žloutnout. Po vytažení zkušebních těles z klimatické komory bylo zjištěno, že se na tělesech objevily mikrotrhliny. Materiál po degradaci v komoře ztratil svou tažnost a zkřehnul vlivem fotooxidace. Měření komplikoval výkon klimatické komory, který byl ovlivněn nedostatečným větráním celé místnosti.

Pro rychlejší výsledky změn materiálů by bylo zapotřebí vytvořit odsávání teplého vzduchu z komory a zakoupit klimatizační jednotku pro chlazení prostoru komory. Problém je i s odpadní vodou, která odtéká do kanystru. Tento kanystr se musí vylévat po šesti hodinách ošťiku. Po těchto vylepšeních by byla komora schopna pracovat s daleko větším výkonem, a tím by se dala zkrátit doba degradace až 8krát. Problém s odpadní vodou by se dal vyřešit spínaným čerpadlem, které by bylo umístěno v kanystru.

Vyhodnocování všech zkušebních těles probíhalo po zkouškách mechanické pevnosti na trhačím stroji. Po provedení trhačích zkoušek bylo zjištěno, že většina zkušebních těles

se netrhala uprostřed, protože nebyly správně nastavené parametry tisku. Špatné nastavení tisku neovlivnilo výsledky, ale kdyby bylo použito zařízení s průtahoměrem, tak by vlivem tohoto nastavení nešla odečíst hodnota protažení. Kdyby bylo měření prováděno znova, tak nastavení začátku tisku perimetru není vhodné dávat na okraj tělesa, ale přímo doprostřed. Při nastavení tisku od středu tělesa by dle úvahy mělo dojít k roztržení přímo uprostřed. V měření tahových vlastností vznikaly drobné odchylky v mechanických vlastnostech od parametrů udávaných výrobcem. Naměřené hodnoty se liší od technických listů, které udává výrobce, protože každý výrobce vytváří jiná zkušební tělesa. Totožných výsledků by se dalo dosáhnout, jen kdyby na 3D tištěné tělesa byla vytvořena norma, dle které by se navrhovaly zkušební tělesa. Výrobce udává většinou jen hodnotu pevnosti v tahu a neuvádí, jak by se tělesa mohla žíhat, a tím zlepšovat vlastnosti materiálů. Dále výrobce většinou neuvádí vliv UV záření na materiály. Cílem jedné části praktické zkoušky tedy bylo sjednotit působení žíhání a degradace v klimatické komoře, aby bylo zjištěno, jak se navzájem tyto dva procesy ovlivňují. Takové měření nebylo zatím prováděno, a tudíž všechna nastavení přístrojů byla volena dle teorie o polymerních materiálech. Z měření bylo zjištěno, že u materiálu HIPS žíhání razantně neovlivňuje pevnost, ale snižuje tažnost materiálu. Degradace v klimatické komoře zapříčinila, že HIPS ztuhl natolik, že bylo možné pozorovat trhliny na povrchu materiálu a při tahové zkoušce se prokázalo, že se snížila tažnost materiálu až o 10 %. Materiál ASA se choval přesně dle teorie a nejevil žádné větší změny po klimatické degradaci ani při žíhání. Materiál PLA, také dobře odolával kombinaci žíhání a klimatické degradace. Dle výsledků lze usoudit, že materiálu PLA HTPRO změnilo vlastnosti spíše žíhání a samotná komora zkušební tělesa moc neovlivňovala. Na vzorky byla aplikována akustická emise, která bohužel nebyla schopna zaznamenat data, která by dokázala popsat například trhliny v materiálu. Pro lepší výsledky by bylo třeba snížit rychlost tahové zkoušky.

Poznatky z praktické části byly zaneseny do případových studií pro Firmu Bosch, kde byly voleny testované materiály pro návrh různých výrobků. Výrobky byly naskenovány nebo překresleny dle originálních dílů a byly navrženy metody tisku, které je plně nahradí, s menšími náklady. Z případových studií vyplývá, že aditivní výroba je vhodná pro všechny výrobky a nahrazením stávající výroby se ušetří finanční prostředky. Dle výsledků lze doporučit firmě zakoupit průmyslovou FDM tiskárnu značky Ultimaker s3. Tato tiskárna má dvě hlavy a je schopna tisknout podpory z jiného materiálu než, ze kterého je tisknut celý objekt, a tím je schopna ušetřit nemalé prostředky. Při tisku dvou materiálů je možnost dávat podpory pro lepší kvalitu tisku i tam, kde by nebylo snadné jejich odstranění, protože se mohou vytisknout z materiálu PVA, který je rozpustný ve vodě. Pro firmu Bosch bylo dále vymyšleno školení pro personál, aby byl využit plný rozsah aditivní výroby.

# LITERATURA

- [1] ČÁSLAVSKÝ, František. *ZKOUŠKY VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PRO 3D TISK*.  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191480](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191480), 2019. Dostupné také z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191480](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191480). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.
- [2] BEDNÁŘ, Vít. *Porovnání materiálových vlastností plastových dílů zhotovených na 3D tiskem a technologií vstříkovaní*. VŠB, 2019. Dostupné také z:  
[https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152178/Diplomova\\_prace\\_Vit\\_Bednar.pdf?sequence=1](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152178/Diplomova_prace_Vit_Bednar.pdf?sequence=1). Diplomová práce. VŠB. Vedoucí práce Ing. Lukáš Běhálek, Ph.D.
- [3] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to SLA 3D printing. *3D HUBS* [online]. online: 3d HUBS, 2017 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- [4] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to FDM 3D printing. *3D HUBS* [online]. online: 3d HUBS, 2017 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [5] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. HP MJF vs. SLS: A 3D printing technology comparison. *3D HUBS* [online]. online: 3d HUBS, 2017 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- [6] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to material jetting 3D printing. *3D HUBS* [online]. online: 3d HUBS, 2017 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [7] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to binder jetting 3D printing. *3D HUBS* [online]. online: 3d HUBS, 2017 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- [8] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. DMLS Metal 3D printing service. *3D wiser* [online]. online: 3D wiser, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/3d-printing/processes/dmls-slm/>
- [9] 3D wiser. *3D wiser* [online]. online: 3D wiser, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://3dwise.com/produkty/3d-tiskarny/kompozity/markforged/markforged-x3-x5-a-x7/#materials>
- [10] ABS - AKRYLONITRIL-BUTADIÉN-STYRÉN. *Resinex* [online]. online: resinex, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html>

- [11] JANEČKO, Dominik. *Mechanické vlastnosti 3D tisku* [online]. VYSOKÁ ŠKOLA BĀŇSKÁ, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/128834/JAN0491\\_FMMI\\_B3923\\_3911R034\\_2018.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/128834/JAN0491_FMMI_B3923_3911R034_2018.pdf?sequence=1). VŠB.
- [12] Concept Models Gain Strength with ABS-M30. In: *Stratasys* [online]. stratasy: Stratasys, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30>
- [13] Vlákno PLA. *Wikipedie* [online]. online: wikipedie, 2020 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1kno\\_PLA](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1kno_PLA)
- [14] PLA. *Stratasys* [online]. online: Stratasys, 2019 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/pla>
- [15] PET, PET-G. *Materialpro3D* [online]. online: materialpro3d, 2019 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [16] Markforged X3, X5 a X7. *3dwiser* [online]. online: 3Dwiser, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kompozity/markforged/markforged-x3-x5-a-x7/#materials>
- [17] MATERIAL DATASHEET. *Markforged* [online]. online: Markforged, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf>
- [18] Formlabs Rigid Resins. *3dwiser* [online]. online: Markforged, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/pryskyrice/formlabs-rigid-resins--pevne-pryskyrice/>
- [19] Automotive 3D printing applications. *3D HUBS* [online]. online: 3Dhubs, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/automotive-3d-printing-applications/>
- [20] 3D printing for grips, jigs and fixtures. *3D HUBS* [online]. online: 3Dhubs, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-grips-jigs-and-fixtures/>
- [21] REDWOOD, Ben. 3D printing low-run injection molds. *3D HUBS* [online]. online: 3Dhubs, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-low-run-injection-molds/>
- [22] REDWOOD, Ben. Producing low-cost cast metal parts using 3D printing. *3D HUBS* [online]. online: 3Dhubs, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/producing-low-cost-cast-metal-parts-using-3d-printing/>
- [23] BĚHÁLEK, Luboš. Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. *Polymery* [online]. online: code creator, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [24] *HIPS Extrafill: katalogový list*. Fillamentum. web, 2018. Dostupné také z: [https://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/technical\\_data\\_sheet\\_hips\\_extrafill\\_03012019.pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/technical_data_sheet_hips_extrafill_03012019.pdf)
- [25] *ASA smartfil: katalogový list*. Smartfill. web, 2018. Dostupné také z: [https://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/ficha\\_t\\_cnica\\_asa-1.pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/ficha_t_cnica_asa-1.pdf)

- [26] ČSN EN ISO 527-1. *Stanovení tahových vlastností: Obecné principy*. Web. Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: Česká agentura pro standardizaci, Duben 2020.
- [27] ČSN EN ISO 527-2. *Stanovení tahových vlastností: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Web. Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: Česká agentura pro standardizaci, Duben 2020.
- [28] Žihání termoplastů. *Mmspektrum* [online]. online: Průmyslové spektrum, 2020, 1.4.2020 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zhani-termoplastu>
- [29] ČSN ISO 2768-1. *Nepředepsané mezní úchytky délkových a úhlových rozměrů*. Federální úřad pro normalizaci a měření. Praha: Vydavatelství norem, 1992.
- [30] Xe-3 Xenon Test Chamber [online]. 2015. web: Q-SUN, 2015 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.q-lab.com/en-gb/products/q-sun-xenon-arc-test-chambers>
- [31] *Účinky a užití optického záření* [online]. 4/2011. web: účinky a užití optického záření, 2011 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44295.pdf>
- [32] *Degradace polymerů* [online]. 2013. web: Katedra materiálového inženýrství ČVUT, 2011 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: [http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IMP/IMP\\_10.pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IMP/IMP_10.pdf)

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
AV	Aditivní výroba
SLA	Stereolitografie
FDM	Fused deposition modeling
DMLS	Direct metal laser sintering
FFF	Fused filament fabrication
PLA	Polyacid acid
PET-G	Polyethylen terephthalate glycol
HIPS	Polystyren
ASA	Akrylonitril-Styren-Akryl
ABS	Acrylonitrile butadien styren
SLS	Selective laser sintering
CNC	Computer Numerical Control

## Symboły:

$R_m$	Mez pevnosti v tahu	(MPa)
$F_{\max}$	Maximální zatížení v tahu	(N)
$S_0$	Počáteční průřez zkušebního tělesa	(mm <sup>2</sup> )
$R_e$	Napětí na mezi kluzu	(MPa)
$F_e$	Zatížení	(N)
$Z$	Koncentrace	(%)
$\Delta S$	Rozdíl počátečního a vzniklého průřezu	(mm <sup>2</sup> )
$S_1$	Konečný průřez zkušebního tělesa	(mm <sup>2</sup> )
$A$	Tažnost	(%)
$\Delta L$	Jmenovité poměrné prodloužení	(N)
$L_0$	Počáteční délka zkušebního tělesa	(mm <sup>2</sup> )
$L_1$	Konečná délka zkušebního tělesa	(mm <sup>2</sup> )
$E$	Modul pružnosti	(MPa)
$\varepsilon$	Relativní prodloužení	(mm)
$\sigma$	Napětí	(MPa)

# PŘÍLOHA 1 NASTAVENÍ TISKU PRO OPAKOVÁNÍ MĚŘENÍ

*Tabulka 35 Nastavení tiskového profilu pro materiál ASA*

Parametry tisku	Nastavené hodnoty
Teplota extruderu	215 °C
Teplota podložky	65 °C
Chlazení tisku	100 %
Chlazení od vrstvy	Čtvrtá vrstva
Rychlost tisku	70 mm/s
Výška vrstvy	0,2 mm
Šířka vrstvy	0,8 mm
Počet perimetrů	12
Začátek tisku vrstvy	Pravý roh vnější
Plnění	100 %
Retrakce	Jen při změně vrstvy
Komora	NE

*Tabulka 36 Nastavení tiskového profilu pro materiál ABS*

Parametry tisku	Nastavené hodnoty
Teplota extruderu	215 °C
Teplota podložky	65 °C
Chlazení tisku	100 %
Chlazení od vrstvy	Čtvrtá vrstva
Rychlost tisku	70 mm/s
Výška vrstvy	0,2 mm
Šířka vrstvy	0.8 mm
Počet perimetrů	12
Začátek tisku vrstvy	Pravý roh vnější
Plnění	100 %
Retrakce	Jen při změně vrstvy
Komora	NE

*Tabulka 37 Nastavení tiskového profilu pro materiál HIPS*

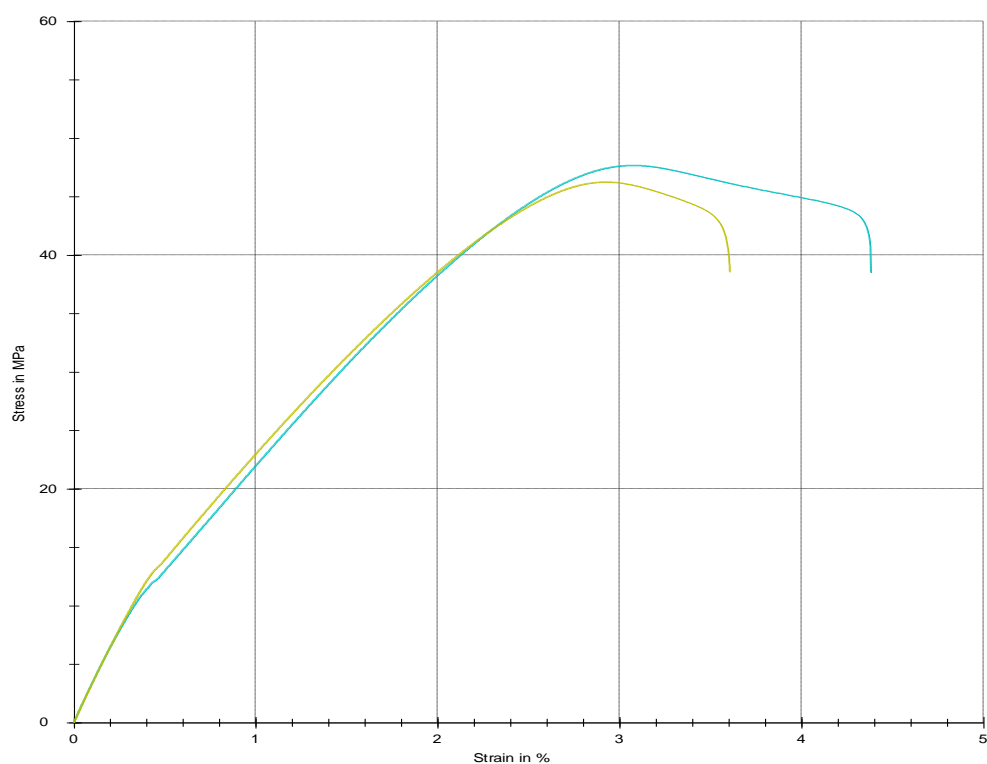
Parametry tisku	Nastavené hodnoty
Teplota extruderu	230 °C
Teplota podložky	100 °C
Chlazení tisku	30 %
Chlazení od vrstvy	Čtvrtá vrstva
Rychlost tisku	45 mm/s
Výška vrstvy	0,2 mm
Šířka vrstvy	0.8 mm
Počet perimetrů	12
Začátek tisku vrstvy	Pravý roh vnější
Plnění	100 %
Retrakce	Jen při změně vrstvy
Komora	NE

*Tabulka 38 Nastavení tiskového profilu pro materiál PLA HTPRO*

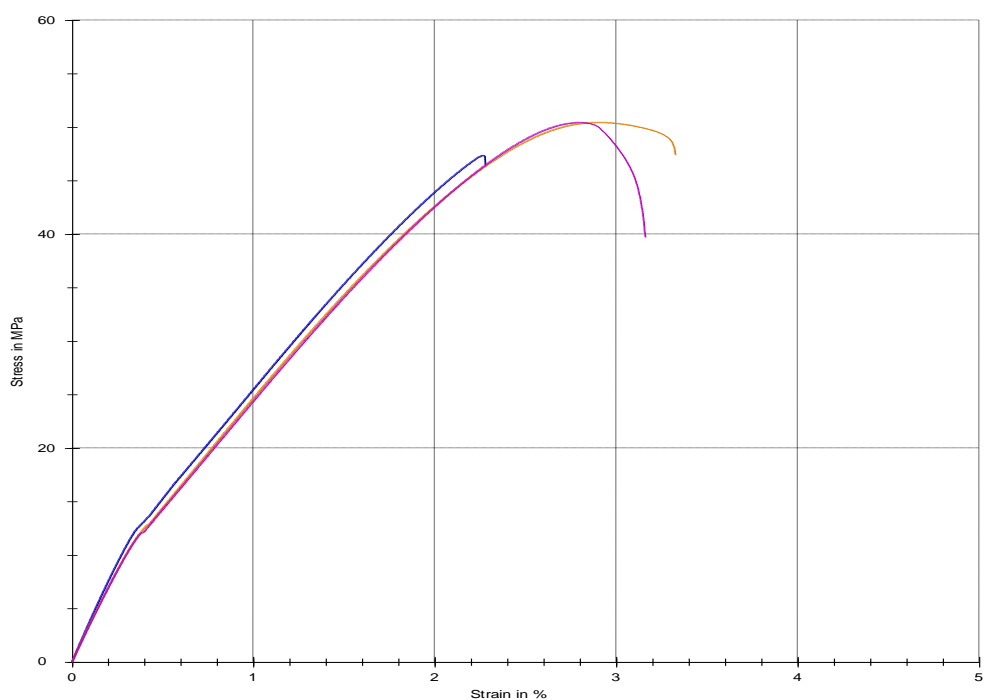
Parametry tisku	Nastavené hodnoty
Teplota extruderu	220 °C
Teplota podložky	60 °C
Chlazení tisku	100 %
Chlazení od vrstvy	Třetí vrstva
Rychlost tisku	55 mm/s
Výška vrstvy	0,2 mm
Šířka vrstvy	0.8 mm
Počet perimetrů	12
Začátek tisku vrstvy	Pravý roh vnější
Plnění	100 %
Retrakce	Jen při změně vrstvy
Komora	NE



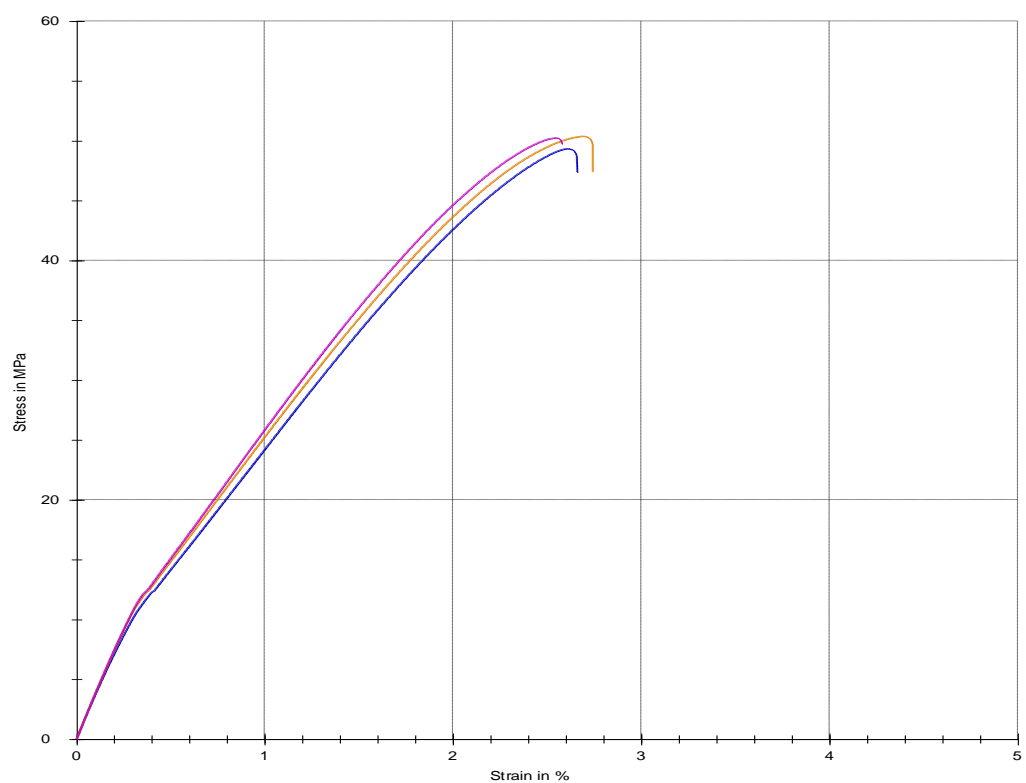
## PŘÍLOHA 2 TAHOVÉ DIAGRAMY PLA HTPRO



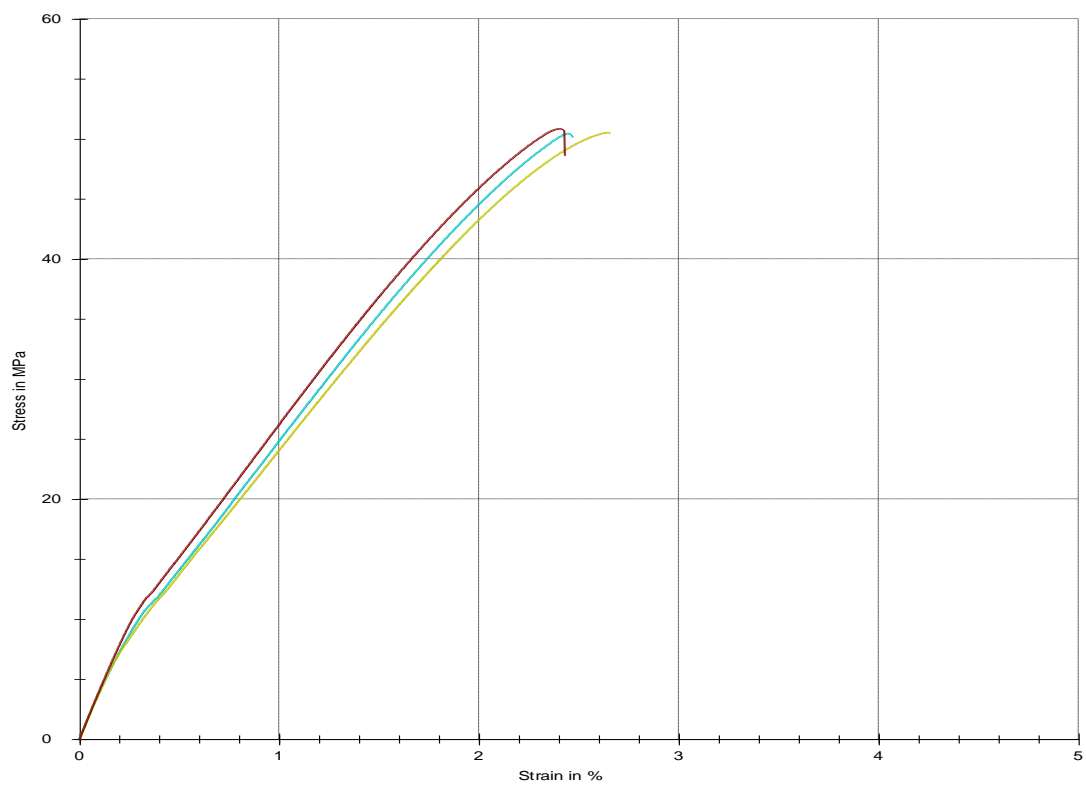
*Graf 13 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (nežihány, komora NE)*



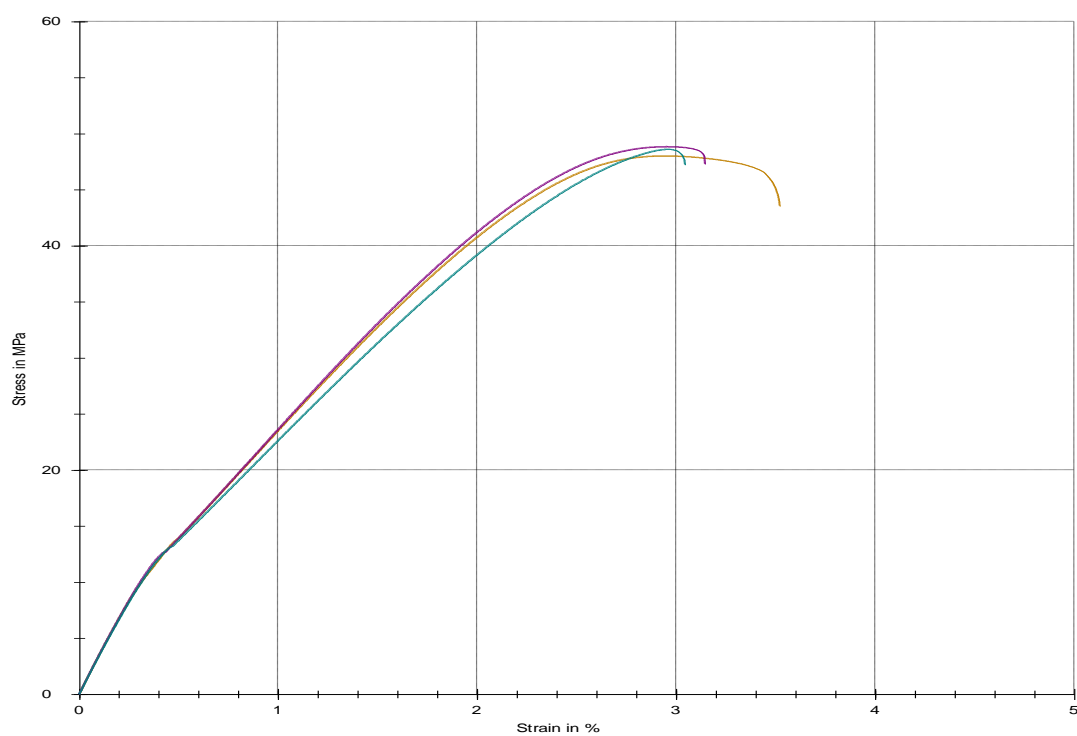
*Graf 14 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 80 °C, komora NE)*



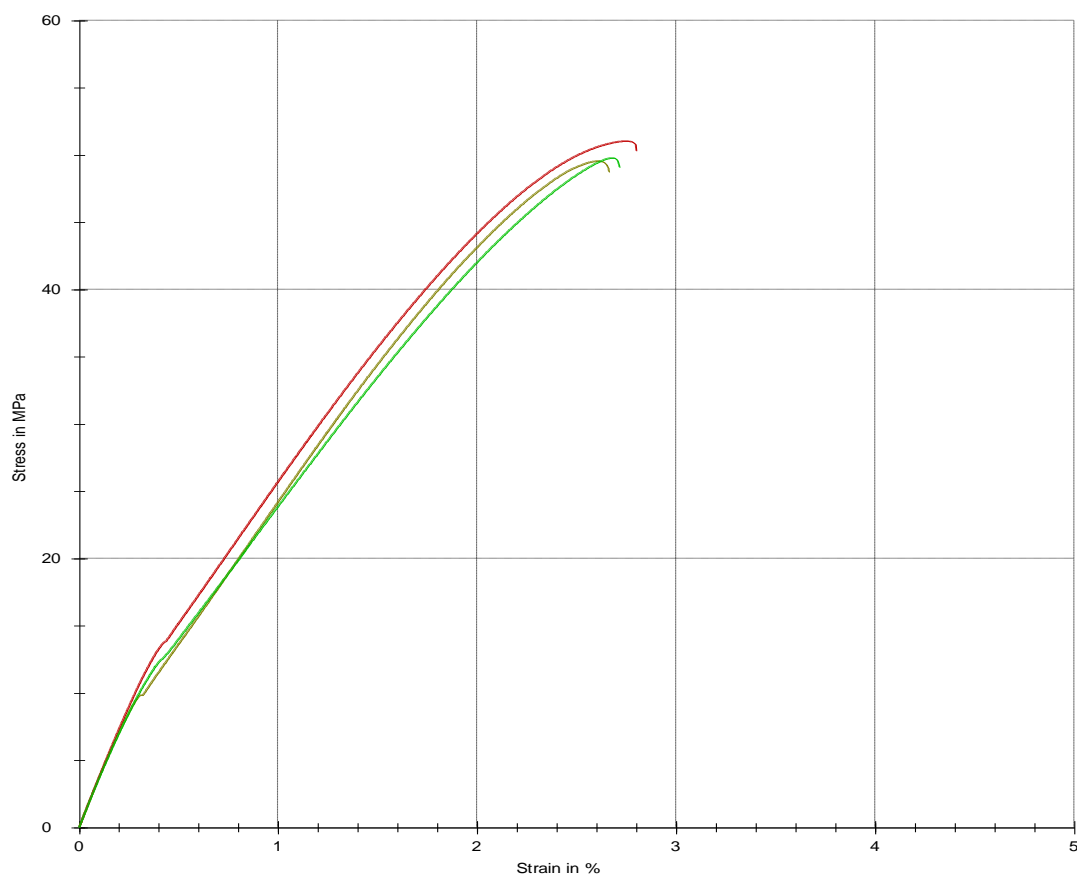
*Graf 15 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 100 °C, komora NE)*



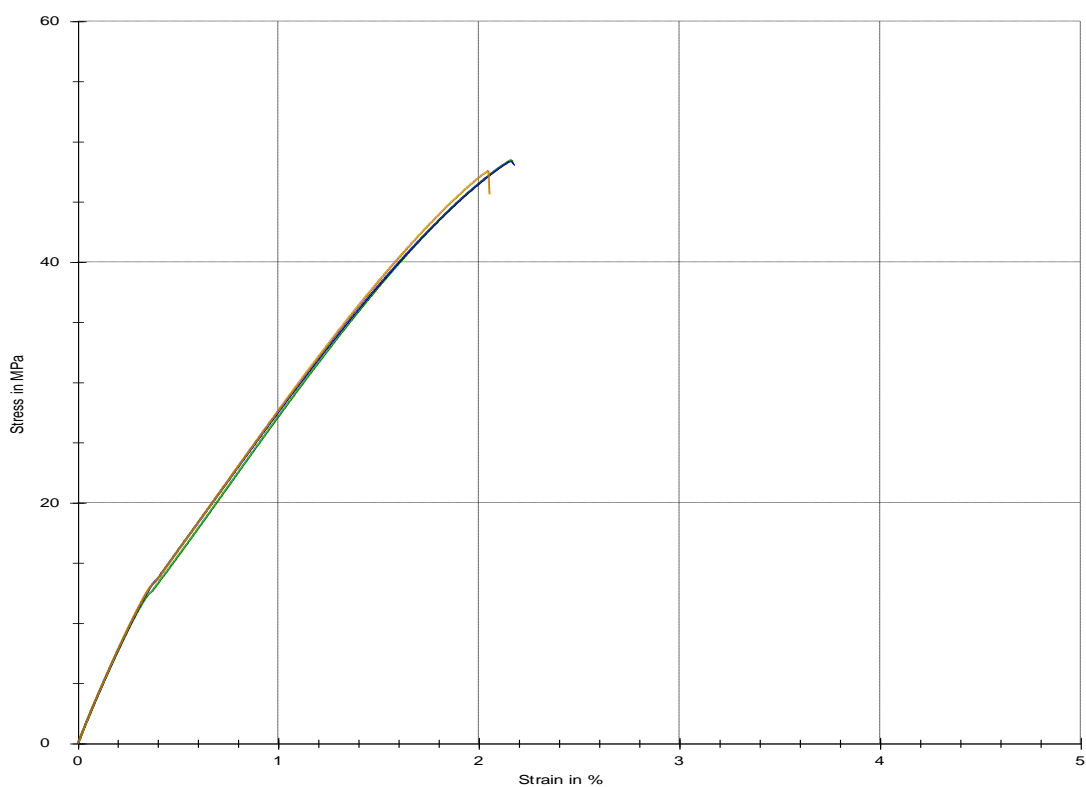
*Graf 16 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 120 °C, komora NE)*



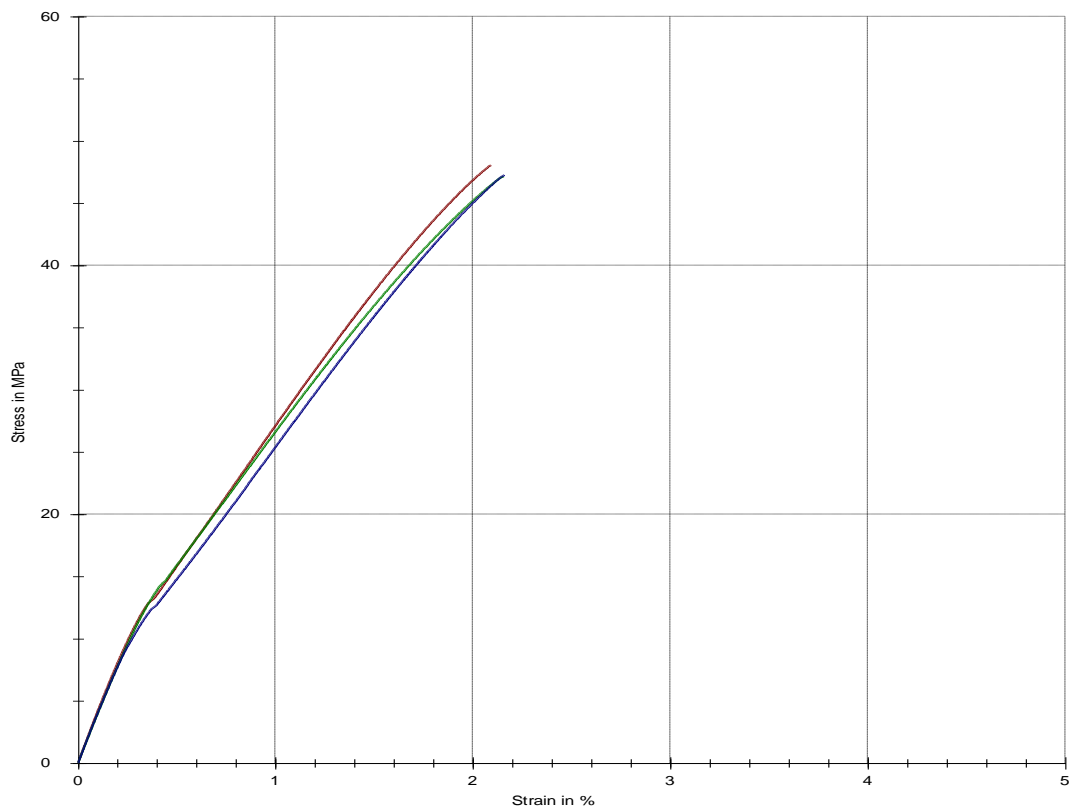
*Graf 17 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (nežiháno, komora ANO)*



*Graf 18 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žihání 80 °C, komora ANO)*

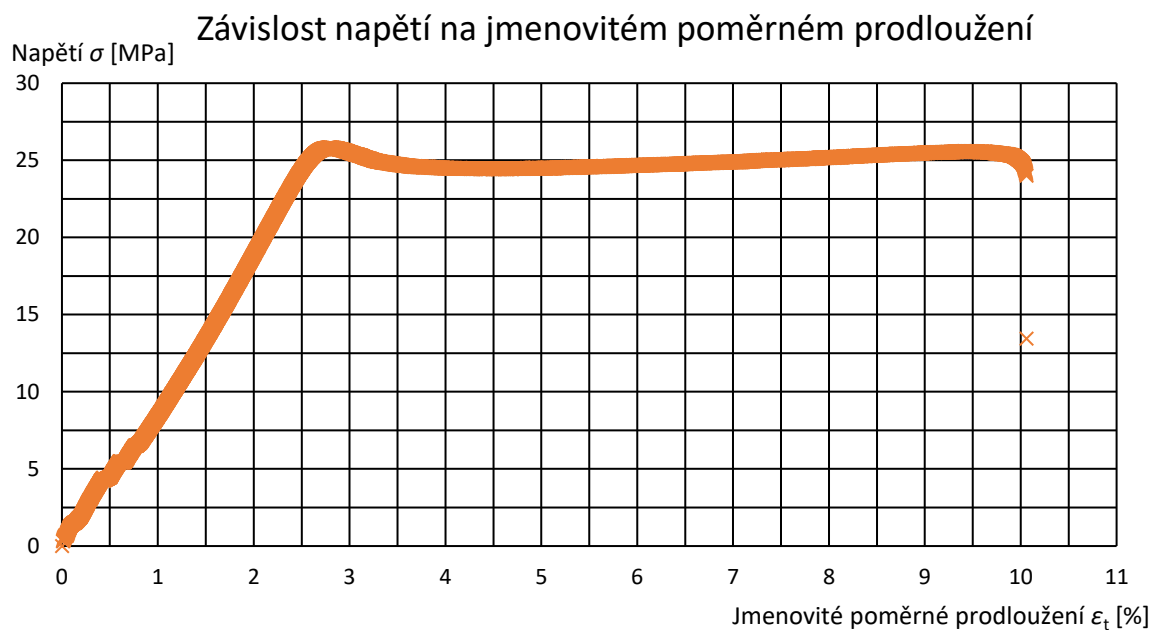


*Graf 19 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žíhání 100 °C, komora ANO)*

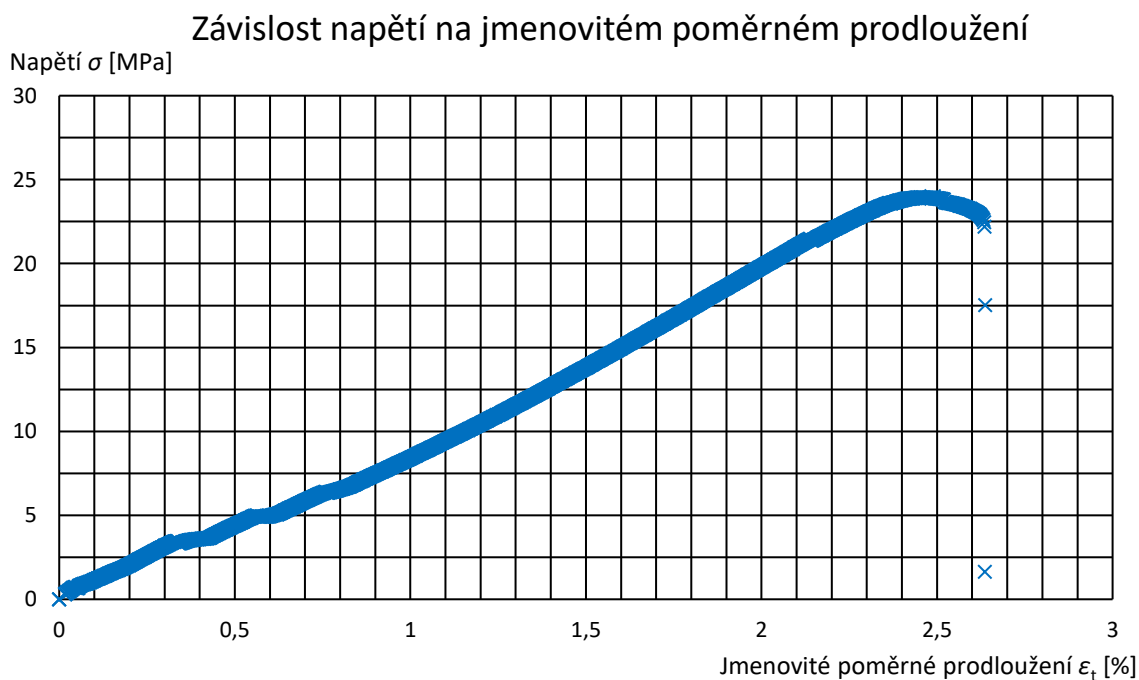


*Graf 20 Tahového diagramu pro materiál PLA HTPRO (žíhání 120 °C, komora ANO)*

## PŘÍLOHA 3 TAHOVÉ DIAGRAMY HIPS

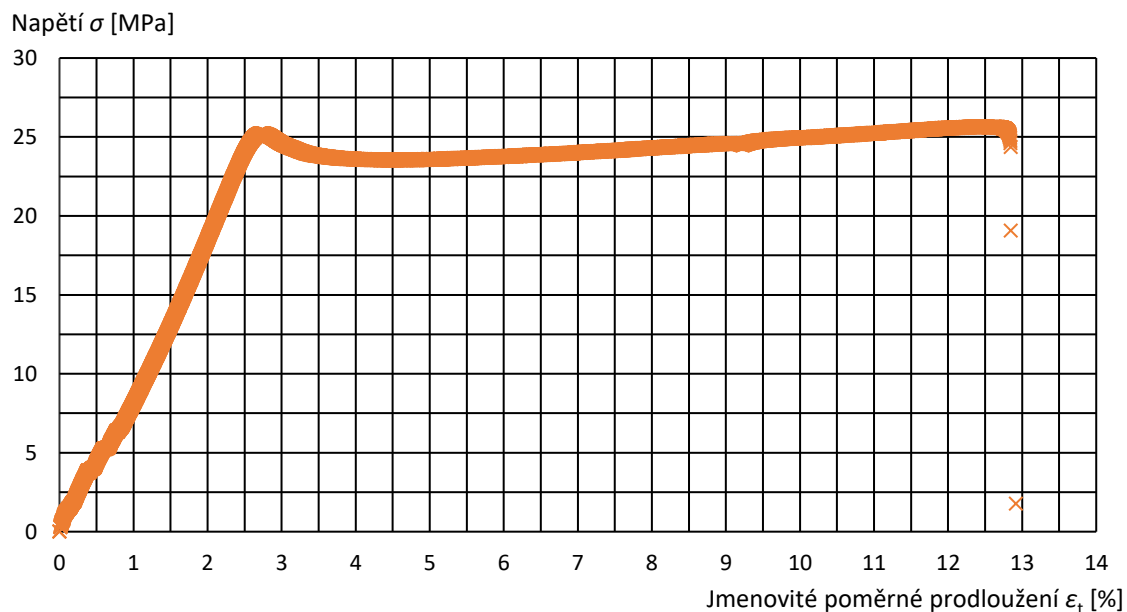


Graf 21 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 0 °C, Klimatická komora NE)



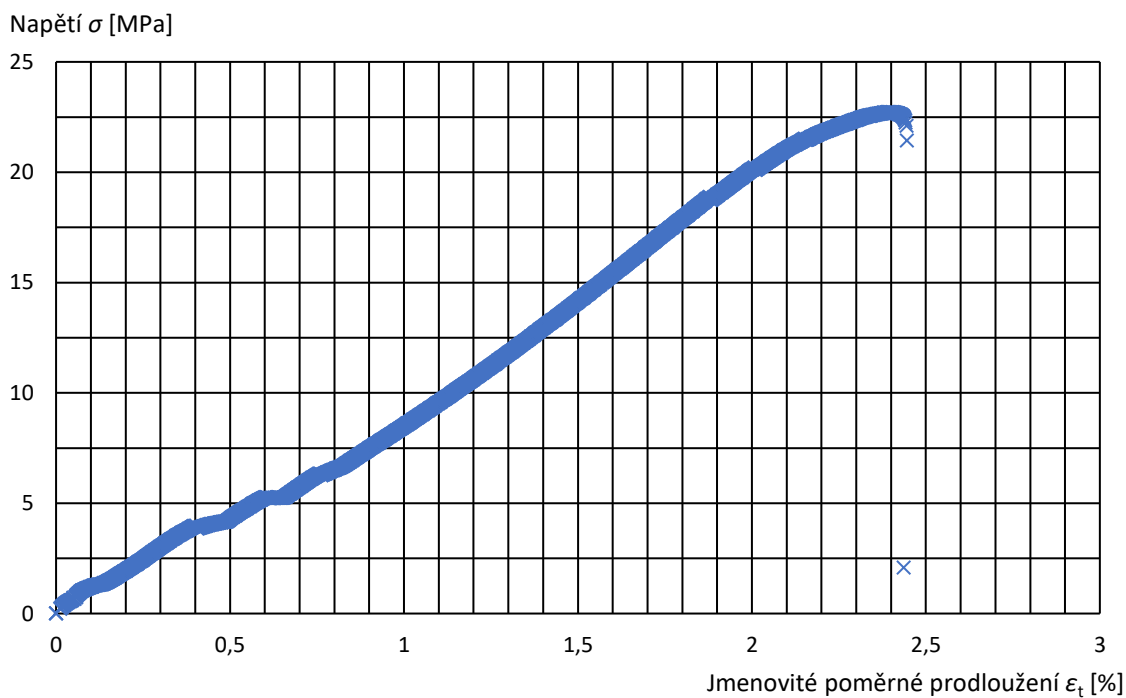
Graf 22 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 0 °C, Klimatická komora ANO)

### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení



Graf 23 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 70 °C, Klimatická komora NE)

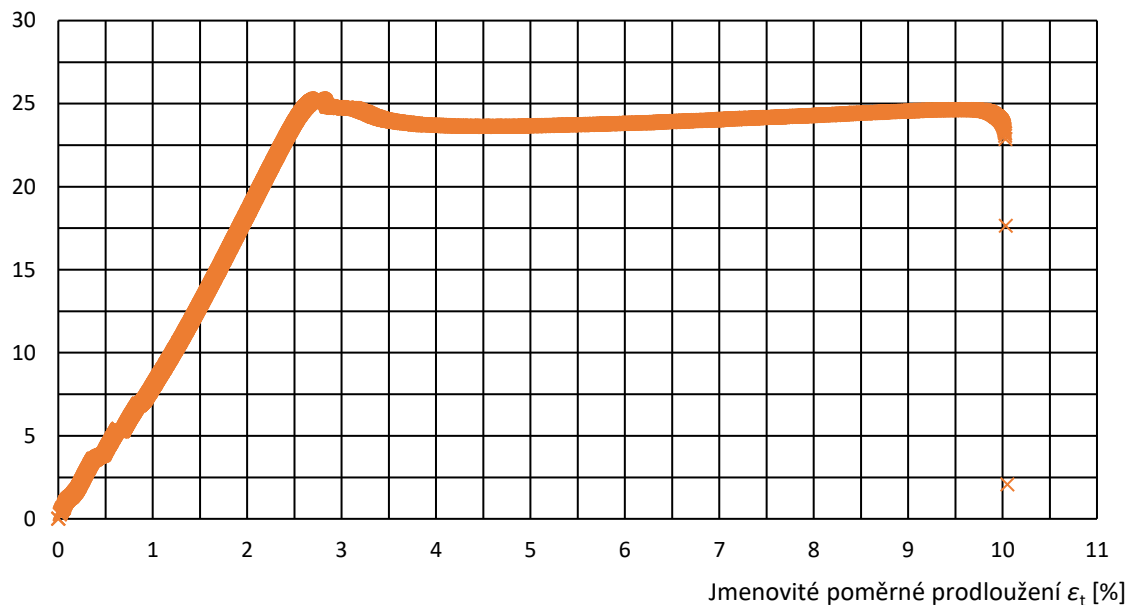
### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení



Graf 24 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 70 °C, Klimatická komora ANO)

### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení

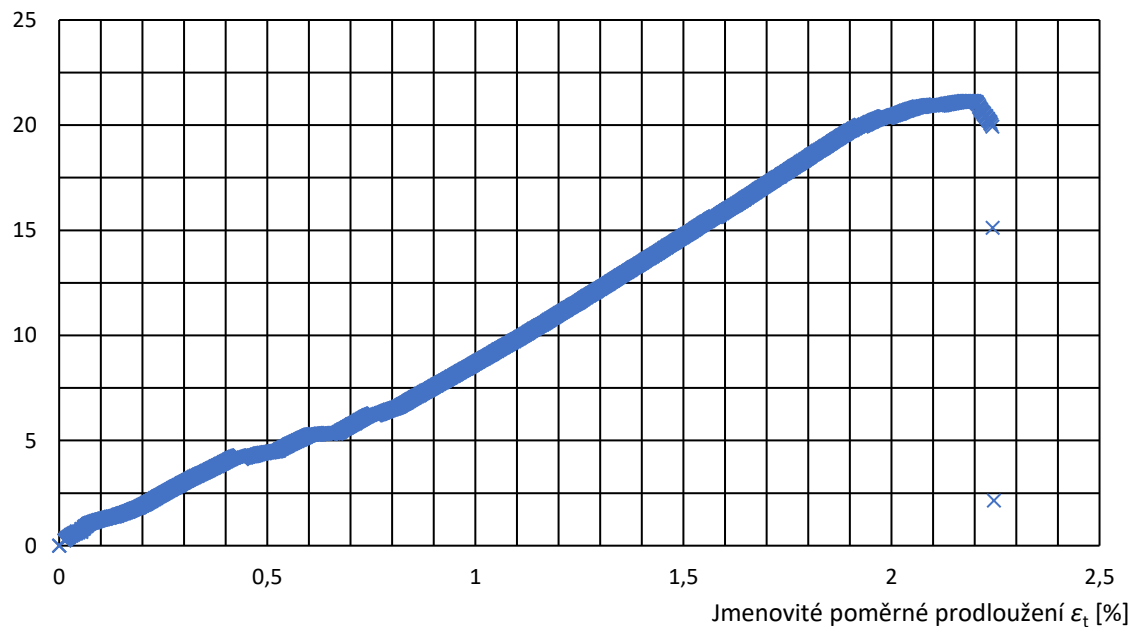
Napětí  $\sigma$  [MPa]



Graf 25 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 80 °C, Klimatická komora NE)

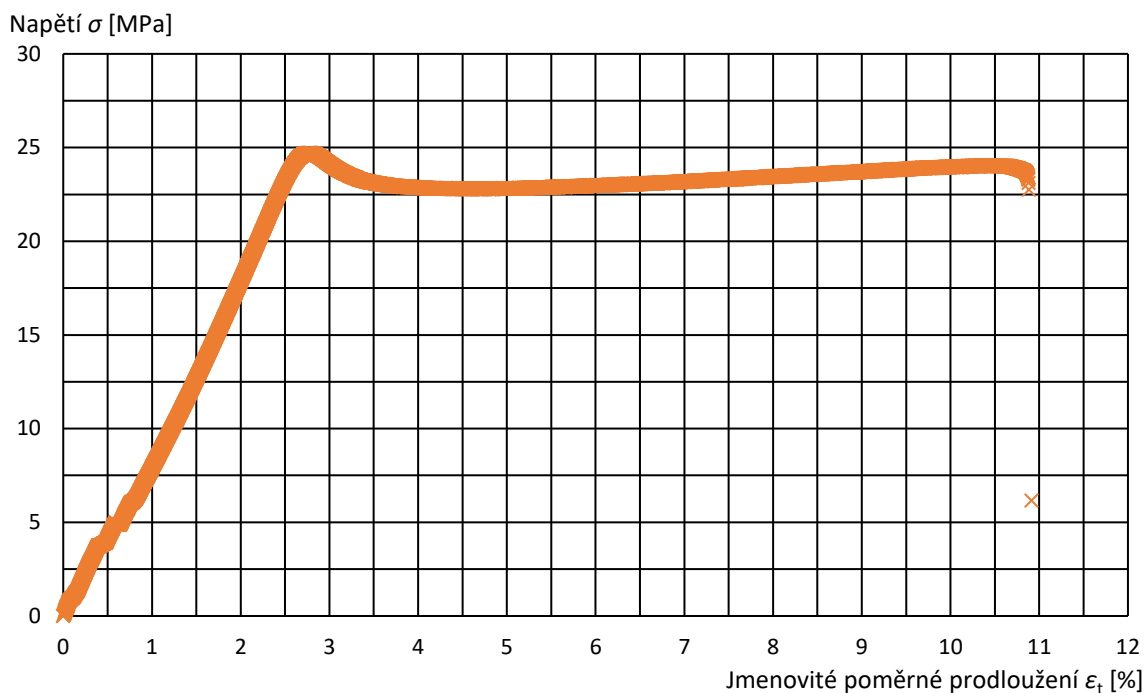
### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení

Napětí  $\sigma$  [MPa]



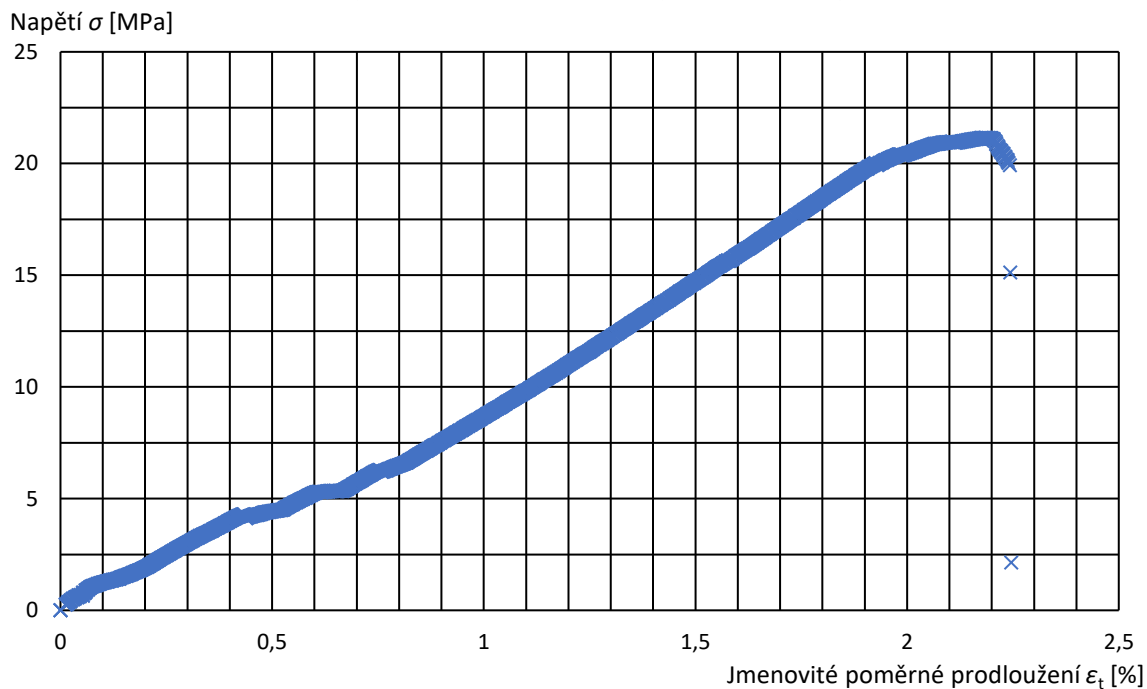
Graf 26 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 80 °C, Klimatická komora ANO)

### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení



Graf 27 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 90 °C, Klimatická komora NE)

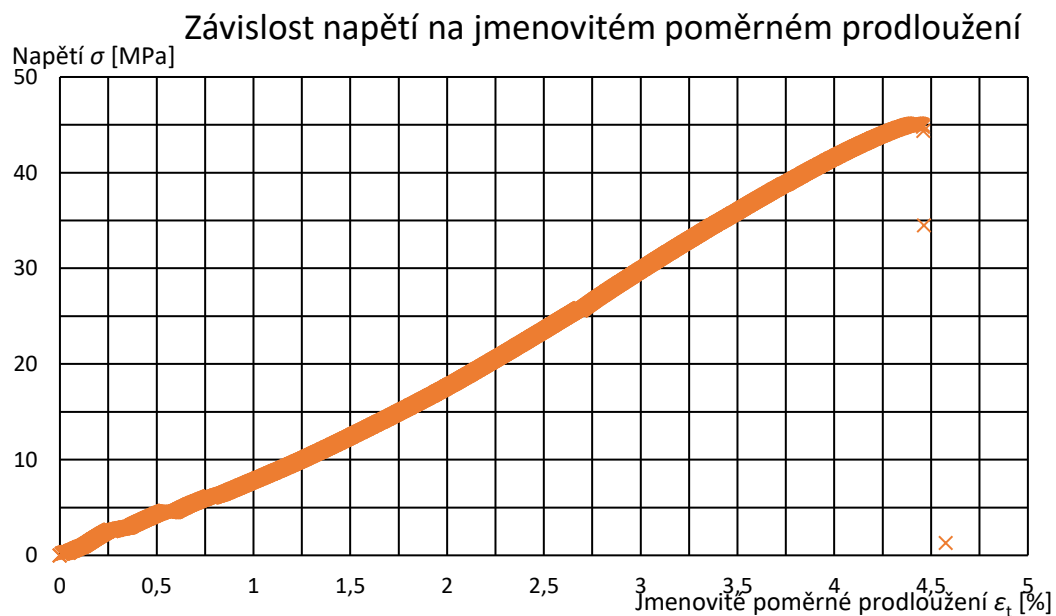
### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení



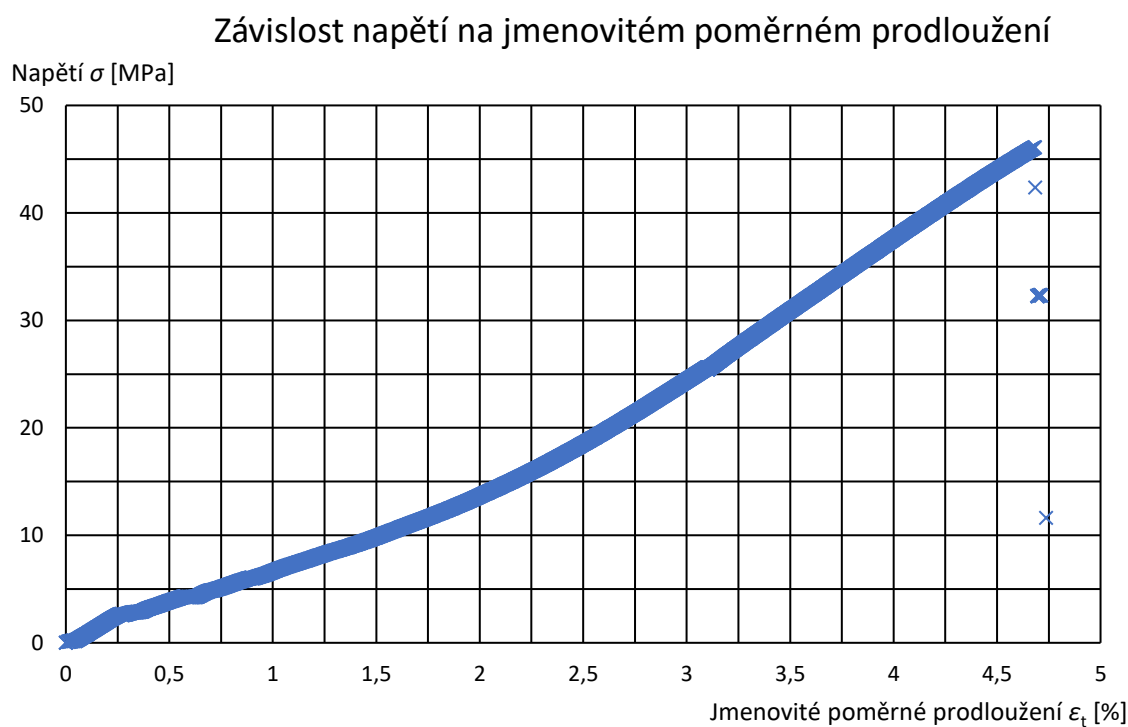
Graf 28 Tahového diagramu materiálu HIPS (Žihání 90 °C, Klimatická komora ANO)



## PŘÍLOHA 3 TAHOVÉ ZKOUŠKY ASA

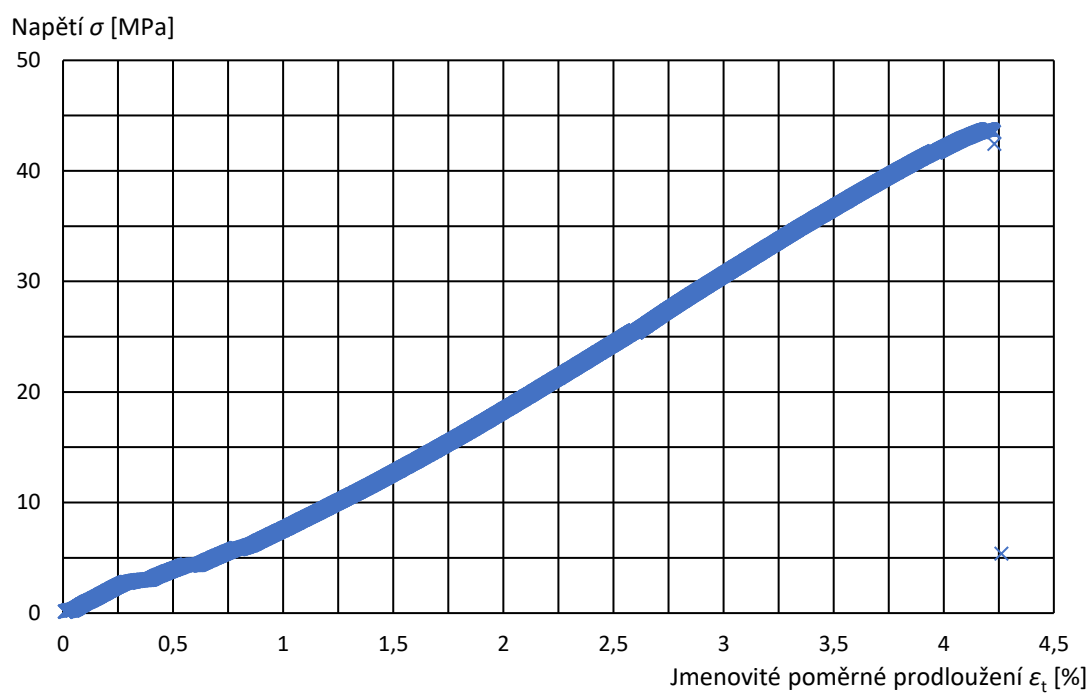


Graf 29 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 0 °C, Klimatická komora NE)



Graf 30 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 0 °C, Klimatická komora ANO)

### Závislost napětí na jmenovitém poměrném prodloužení



*Graf 31 Tahového diagramu materiálu ASA (Žihání 90 °C, Klimatická komora ANO)*